L'USINE NOUVELLE

SÉRIE | GESTION INDUSTRIELLE

François Monchy
Jean-Pierre Vernier

MAINTENANCE

Méthodes et organisations

3e édition

DUNOD

François Monchy
Jean-Pierre Vernier

MAINTENANCE

Méthodes et organisations

3e édition

L'USINENOUVELLE

DUNOD

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

© Dunod, Paris, 2000, 2003, 2010

ISBN 978-2-10-055061-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

PRÉFACE

En deux décennies, le développement de l'automatisation des systèmes de production a réduit de façon spectaculaire les emplois dans l'industrie. Les machines d'aujourd'hui produisent à la place des hommes et les usines fabriquent plus et mieux en 2000 qu'en 1980, avec des effectifs en constante diminution.

Autrefois présent dans les ateliers, le taylorisme est aujourd'hui installé au cœur des automates et accroît ainsi la complexité des outils de mise en œuvre. Automatisation et miniaturisation des composants permettent de fournir l'énergie partout où elle est nécessaire, mais aussi de la doser finement. Les actionneurs électriques ou hydrauliques remplacent les chaînes cinématiques complexes et les régulations numériques concurrencent la précision des femmes et des hommes. Sous l'effet conjugué de la baisse des prix de revient et de la formation des concepteurs, ces principes de conception se répandent dans tous les secteurs de l'industrie.

Progressivement, le travail humain disparaît inéluctablement des ateliers pour laisser les machines produire sans surveillance, enfin presque… quand les machines produisent seules, les causes d'arrêt sont vite critiques quelle que soit leur nature. Les pannes ainsi que la maintenance préventive des machines pendant la durée de production engendrent des pertes. Mais d'autres causes interrompent la production aussi sûrement que les pannes. Pas de pièce en sortie parce qu'on a « oublié » d'alimenter les machines ou parce que le conducteur de ligne est absent. Moins de pièces que prévu parce que le produit à l'entrée provient d'un fournisseur différent. Des produits en quantité mais non conformes, parce que la machine est déréglée…

Quel que soit le secteur industriel observé, le développement de l'automatisation imprime les mêmes marques. Maîtriser de façon durable le fonctionnement de systèmes de production de plus en plus complexes s'impose comme l'enjeu industriel des décennies futures. Gare aux rendements qui stagnent ou qui baissent ! La part du travail humain direct dans le prix de revient direct des produits tendant à devenir marginale à l'avenir, la différenciation entre entreprises reposera plus sur la *capacité à maintenir le rendement au plus haut niveau que sur l'aptitude à réduire le coût du travail humain*, déjà à la portion congrue. Car le rêve de voir les machines produire sans aucune intervention humaine bute aujourd'hui sur une réalité incontournable : elles s'usent encore en « travaillant ». Quant à celles qui se répareraient elles-mêmes, elles ne sont pas encore nées du cerveau, pourtant fertile, de nos brillants ingénieurs.

C'est pour cette raison que la maintenance représente une activité essentielle au maintien de la production à un niveau satisfaisant, tout comme la maintenance de

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

la station spatiale Mir est essentielle à son maintien en orbite stable autour de la Terre. Dans ce contexte, s'il est une catégorie d'hommes et de femmes qui n'est pas en voie d'extinction, c'est bien celle des spécialistes de maintenance. Ils resteront à l'avenir les professionnels de la santé des machines et leur rôle sera souvent double : *maintenir les machines* et *surveiller la production elle-même*.

Mais produire bien et à temps s'accommode de moins en moins des approches empiriques et des raisonnements simplistes. C'est une exigence qui démontre la nécessité d'un enseignement structuré de la maintenance.

L'ouvrage que nous livre François Monchy apporte une contribution importante à cet enseignement et lui confère ses lettres de noblesse. En rassemblant dans un livre pratique les informations essentielles, l'auteur réalise une œuvre utile qui facilitera la tâche des utilisateurs. La référence aux normes européennes de maintenance en cours d'élaboration et aux normes françaises existantes démontre, si besoin en était, l'immense intérêt d'associer le plus tôt possible dans ce processus qu'est la normalisation tous les acteurs concernés par un même domaine : industriels producteurs, entreprises de services en maintenance et enseignants. Les normes constituent en effet un référentiel structurant pour élaborer un enseignement adapté aux besoins des industriels. Pour celles et ceux qui se sont investis dans le programme européen de normalisation en maintenance, cet ouvrage démontre ainsi que leur action n'est pas vaine.

Tous les responsables de maintenance et de production devraient lire ce précieux ouvrage, qui leur permettra d'évaluer clairement les enjeux de leur activité au sein de leur entreprise et d'œuvrer ensemble à la maîtrise du rendement productif.

Claude Pichot,
président de l'Association française
des ingénieurs et responsables de maintenance.

AVANT-PROPOS

« Mieux vaut penser le changement que changer le pansement. »
Pierre Dac

La maintenance n'est pas une destination, c'est un voyage

La vie des entreprises des pays industrialisés ou en voie de l'être est caractérisée par des mutations profondes : technologiques, économiques et sociales. Supprimant certains types d'emplois, ces mutations posent des problèmes sociaux évidents : il n'y a qu'à ouvrir notre journal habituel pour s'en rendre compte. Mais elles créent également des besoins nouveaux qu'il nous faut identifier, puis satisfaire en terme de formation et de qualification des acteurs, de gestion et surtout d'organisation.

Il en est ainsi pour la fonction maintenance, fonction qui a émergé dans les années 1970 à 1980 comme réponse à un besoin nouveau : celui de maîtriser techniquement et économiquement des systèmes productifs automatisés dans un environnement fortement informatisé.

Partant de quelques domaines où la recherche de sécurité jouait un rôle moteur (transports, nucléaire, pétrochimie…), le besoin de maintenance s'est progressivement fait sentir dans toutes les industries et les services, et s'étend dorénavant au tertiaire : maintenance immobilière, maintenance hospitalière, etc. L'aspect économique que représente la croissance du « coût de la panne et de ses conséquences » explique en grande partie l'expansion de ce besoin. D'autre part, la mondialisation des marchés a encore accru ce besoin de maintenir et d'optimiser le niveau de performance des outils de production. En effet, alors que la compétitivité se jouait il y a peu sur l'innovation technologique (recherche de l'outil productif inédit, recherche de solutions automatisées et informatisées), nous pensons que c'est par l'innovation sociale et l'innovation organisationnelle qu'émergeront les entreprises les plus performantes sur ces marchés.

L'enjeu majeur est ou sera la valorisation des ressources humaines. Nous produirons de plus en plus avec des technologies identiques pour tous, mais nous maintiendrons la production en quantité et en qualité avec des hommes. Eux feront la différence. En particulier, les techniciens de maintenance auront un rôle clé pour valoriser le capital productif de l'entreprise. Pour cela ils devront collaborer avec les autres services de l'entreprise : production, contrôle de gestion.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Dans cette perspective, cet ouvrage a pour objectifs :

1. de donner une référence assez complète des bases, des acquis, des savoir-faire avérés de la maintenance. À ce titre, il reprend, complète et actualise l'ouvrage précédent du même auteur paru chez Masson en 1987, intitulé *La Fonction maintenance* et dédié à la formation aux « méthodes » de maintenance. Cette nouvelle édition a été actualisée en 2008 pour tenir compte de l'évolution des normes et du contexte des entreprises ;
2. de participer à la formation de techniciens et de gestionnaires de la maintenance, en les dotant d'outils méthodologiques, mais plus encore en les mettant dans un état d'esprit propice à la fonction, caractérisé par la volonté de maîtriser au lieu de subir et s'appuyant sur :
   – une nécessaire polyvalence associée à de la rigueur,
   – la prise d'initiative au sein d'une équipe,
   – la recherche systématique d'amélioration,
   – le goût de la remise en cause permanente pour plus d'efficacité ;
3. de favoriser la réflexion de chacun face à tous les aspects de la fonction maintenance ;
4. de donner les concepts récents caractérisant les lignes évolutives de la fonction, en Europe et ailleurs. Cela concerne principalement les managers de la maintenance, chargés de faire évoluer les organisations et les compétences : la maintenance se fait et se fera avec des hommes.

La maintenance est un gisement de productivité, de sécurité et de qualité à explorer. Comme pour toute exploration, il faut savoir d'où nous venons (hier, nous subissions) et où nous sommes (aujourd'hui, nous cherchons à maintenir) pour orienter notre avenir : demain, nous devrons acquérir la pleine maîtrise de nos systèmes automatisés. Pour cela, nous devons substituer au réflexe des années 1980 « automatisons, robotisons et informatisons » le réflexe « commençons par former et par organiser, que ce soit en technique ou en gestion. ».

Éloge de la transversalité

Les discussions récentes autour des normes européennes ont mis en évidence deux approches contradictoires pour considérer la maintenance.

1. Une *vision verticale* axée sur le corporatisme, chacun s'appuyant sur la spécificité de son secteur d'activité, de sa spécialité, de son équipement et développant son vocabulaire et ses outils. Chaque secteur est ainsi amené à inventer sa propre maintenance.

Dans ce schéma, les papetiers n'ont pas d'échanges possibles ni voulus avec les gens du nucléaire, les pétroliers avec les laboratoires pharmaceutiques, les marins avec les aéronautes, etc. À l'échelle de l'entreprise, les électroniciens ignorent les chaudronniers, les automaticiens sont séparés des thermiciens et il arrive que l'informaticien méprise le mécanicien.

« Chez nous, c'est spécial. » Combien de fois ai-je entendu cette rengaine à l'époque où je n'avais pas encore acquis la certitude que chez le voisin les problèmes à résoudre étaient de même nature ! Certains pays, certains secteurs industriels,

certaines entreprises et certains professionnels ont encore cette approche corporative de la maintenance. En France, il en était ainsi :

– avant que l'AFNOR ne travaille pour définir un vocabulaire et des méthodes communes à tous les pratiquants ;
– avant que le CNM (Comité national pour la maintenance) et l'AFIM (Association française des ingénieurs de maintenance) ne regroupent des gens de maintenance issus de tous les secteurs pour des réflexions collectives favorisant les progrès de chacun ;
– avant que l'Éducation nationale ne développe des formations de techniciens destinés à des entreprises de tout secteur ;
– avant que les grands groupes ne décloisonnent leur savoir-faire, ne comparent leurs expériences et ne transfèrent leurs méthodes.

2. Une *vision transversale* axée sur le fait avéré que les concepts, les organisations et les méthodes peuvent s'appliquer à tous les secteurs, à des adaptations et à des effets d'échelle près.

En particulier, nous avons pu constater l'évolution convergente d'organisations mises en place de façon cloisonnée. Aux mêmes problèmes à résoudre sont imaginées des solutions semblables. Si nous n'avions pas « emprunté » l'automaintenance, nous l'aurions inventée ! L'une des justifications de cette vision s'appuie sur « l'approche système » des équipements, qui les réduit, quel que soit le secteur d'activité de leurs utilisateurs et quelles que soient leur complexité et leur nature, à une partie opérative interfacée à une partie commande, chacune étant constituée de composants et de technologies largement standardisés, connus et répandus… de par le monde !

Vision transversale interentreprises, mais aussi interservices et interspécialités :

– c'est le décloisonnement entre constructeurs et utilisateurs d'équipement : comment satisfaire les besoins implicites de ceux qu'on ignore ?
– c'est la recherche de la qualité totale, qui associe dans une démarche homogène toutes les fonctions de l'entreprise ;
– c'est la maintenance productive, qui associe les efforts cohérents de la production, de la maintenance et de la qualité avec une convergence d'objectifs économiques, sociaux, sécuritaires et écologiques d'une part ;
– c'est la polyvalence technique, obtenue d'une part par un travail d'équipe regroupant des techniciens de spécialités différentes, d'autre part par des compléments de formation individuelle vers d'autres métiers que celui de base.

Des cloisons tombent, des partenariats se créent : les techniciens apprennent à travailler plus en complémentarité et moins en opposition, que ce soit entre eux ou avec le reste de l'entreprise. Il semble que cette évolution soit à la fois performante et irréversible. Aussi prenons-nous le parti de rédiger cet ouvrage dans cette cohérence transversale et de prôner ces nécessaires décloisonnements.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

À propos de la deuxième édition et des risques industriels

La réédition de cet ouvrage en 2008 est l'occasion de compléments, liés à l'actualité industrielle récente. Le besoin de maintenir s'inscrit dans la mutation de la *civilisation de la peine* vers la *civilisation de la panne* (Y. Lasfargue) qui est aussi la civilisation de la catastrophe, de par la densification des énergies et des populations.

Les gens de maintenance sont en première ligne pour assurer la sécurité de leurs installations, et c'est pourquoi nous avons ajouté au chapitre 8, le paragraphe 8.6 consacré aux méthodes de la « maîtrise du risque ».

Et joignons-nous à Claude Pichot, préfacier de cet ouvrage, pour rappeler aux managers que « le propriétaire d'une installation est également propriétaire des risques associés ».

Remerciements

Je remercie Marie pour ses encouragements et sa patience.

Je remercie mes amis du groupe AFIM-Bretagne : Jean-Paul Le Bideau, Éric Queffelec, Yves-Marie Satre, responsables de services Maintenance, pour leur aide et la pertinence de leurs remarques.

À la mémoire d'Alfred Monchy, capitaine au long cours,
auteur de *Morale professionnelle maritime*, Éditions Challamel, Paris, 1920.
À la mémoire d'Henry Monchy, ingénieur A&M,
auteur de *Entretien et exploitation des ouvrages d'assainissement*,
Éditions Eyrolles, Paris, 1973.

TABLE DES MATIÈRES

A

Les concepts de la maintenance

1 • Définitions et enjeux de la maintenance 3

1.1 La fonction maintenance : l'émergence d'un besoin 3
1.2 Le service maintenance au sein de l'entreprise 11
1.3 Les hommes de maintenance et leur formation 18
1.4 Méthodologie de la maintenance : quelques outils de base 23

2 • Les différentes formes de la maintenance 31

2.1 Les maintenances corrective et préventive 31
2.2 La maintenance systématique 39
2.3 Les maintenances conditionnelle et prévisionnelle 47
2.4 Les autres activités du service maintenance 58

B

La connaissance des équipements et de leurs comportements

3 • La maîtrise de la documentation maintenance 65

3.1 La connaissance des équipements : aspects documentaires 65
3.2 L'inventaire du parc matériel, fichier de base de la GMAO 69
3.3 Le dossier technique équipement (DTE) 70
3.4 Le plan de maintenance 74
3.5 Le fichier historique, base du retour d'expérience 80

4 • Les comportements pathologiques du matériel 87

4.1 Les analyses qualitatives de défaillances et leurs enjeux 87
4.2 Quelques mécanismes de défaillance à connaître 97
4.3 Méthodologie du diagnostic 110
4.4 Les analyses quantitatives de défaillances 118
4.5 Les analyses prévisionnelles de défaillances : apport de la sûreté de fonctionnement (SdF) 126

5 • Fiabilité, maintenabilité, disponibilité 139

5.1 Les analyses FMD des systèmes réparables 139
5.2 La fiabilité : introduction et expressions mathématiques 157
5.3 La fiabilité : analyses par les lois de probabilité 167
5.4 La maintenabilité intrinsèque et opérationnelle 197
5.5 La disponibilité des systèmes réparables 214
5.6 La fiabilité humaine : les erreurs à l'interface homme/machine 234

C

Les fonctions de la maintenance

6 • La fonction méthodes-maintenance 243

6.1 Rôle du service méthodes-maintenance 243
6.2 L'analyse des temps de maintenance 248
6.3 L'analyse des coûts de maintenance 256
6.4 La préparation des actions de maintenance corrective 267
6.5 La préparation des actions de maintenance préventive 274
6.6 L'aide au dépannage 287

7 • Les fonctions ordonnancement, logistique et réalisation 297

7.1 L'ordonnancement des tâches de maintenance 297
7.2 L'ordonnancement des projets : l'outil PERT 313
7.3 La logistique de maintenance : la gestion des pièces de rechange 321
7.4 La fonction réalisation des interventions 331
7.5 L'environnement des équipements : « les 5 S machine » 340

8 • La fonction gestion du service maintenance 349

8.1 Réussir sa GMAO (gestion de la maintenance assistée par ordinateur) 349
8.2 Le tableau de bord de gestion : ratios et indicateurs 368
8.3 Le budget du service maintenance 376
8.4 L'externalisation des travaux de maintenance 382
8.5 Gestion de la sécurité : les aspects réglementaires de la maintenance 398
8.6 Assurer la maîtrise des risques industriels 405

D

Management et organisation de la maintenance

9 • Le management : les objectifs propres à la maintenance 413

9.1 Élaborer son projet « maintenance » 413
9.2 Le management participatif : gage d'efficacité de la maintenance 421
9.3 Le rôle de la maintenance dans un projet qualité 430
9.4 La maîtrise économique du cycle de vie des équipements 440

10 • Évolution de la maintenance : les nouvelles organisations 451

10.3 MBF : maintenance basée sur la fiabilité 482

Bibliographie 510

Acronymes, sigles et abréviations 512

Index 515

A

Les concepts de la maintenance

1 • DÉFINITIONS ET ENJEUX DE LA MAINTENANCE

1.1 La fonction maintenance : l'émergence d'un besoin

1.1.1 Introduction : la maintenance n'est pas une fin en soi

La maintenance est l'une des fonctions de l'entreprise, mais elle n'est pas une fin en soi. À ce titre, elle est peu lisible et parfois méconnue des décideurs qui sous-estiment son impact. Et pourtant, elle devient une composante de plus en plus sensible de la performance de l'entreprise. Il est donc important de la faire mieux connaître.

Concevoir, produire et commercialiser sont des fonctions « naturelles » facilement identifiables et rarement négligées, à juste titre. Par contre, *la maintenance n'est qu'un soutien à la production, son principal client*. C'est donc une fonction « masquée », agissant comme prestataire de service interne et, de plus, fortement évolutive.

Bien organisée, elle est un facteur important de qualité, de sécurité, de respect des délais et de productivité, donc de compétitivité d'une entreprise évoluée : c'est incontestable après expérience, mais ce n'est pas évident de prime abord. C'est souvent « par défaut » que preuve est faite : le coût des conséquences d'une panne majeure, sa médiatisation parfois, joue un rôle moteur dans la prise de conscience qu'on ne peut pas faire l'économie d'une maintenance efficace.

Positionner la maintenance au sein de l'appareil de production est un exercice difficile, comme il est toujours difficile de faire simple dans un environnement complexe. C'est l'objectif de cet ouvrage, dans lequel nous découvrirons au fil des chapitres l'enjeu que représente le maintien efficace des équipements, aussi bien pour la qualité que pour la productivité. Après avoir abordé les méthodes qui permettent le maintien des équipements, nous exposerons les organisations les plus évoluées qui cherchent à optimiser leur usage.

1.1.2 Histoire de la maintenance

❑ Histoire du nom

Le terme « maintenance », forgé sur les racines latines *manus* et *tenere*, est apparu dans la langue française au XII^{e} siècle. L'étymologiste Wace a trouvé la forme *mainteneor* (celui qui soutient), utilisée en 1169 : c'est une forme archaïque de « mainteneur ».

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Anecdotiquement, c'est avec plaisir que j'ai retrouvé l'usage du mot « maintenance » sous la plume de François Rabelais, qui, vers 1533, parlait de la « maintenance de la loy » dans *Pantagruel*.

Les utilisations anglo-saxonnes du terme sont donc postérieures. À l'époque moderne, le mot est réapparu dans le vocabulaire militaire : « maintien dans des unités de combat, de l'effectif et du matériel à un niveau constant ». Définition intéressante, puisque l'industrie l'a reprise à son compte en l'adaptant aux unités de production affectées à un « combat économique » !

❑ Histoire de la fonction maintenance en France

□ De l'entretien des machines à la maintenance de la production

Nous avons pu observer ces vingt dernières années que le service maintenance est l'aboutissement d'une évolution opérée à partir de l'existant : les services entretien traditionnels. Présents dans l'industrie à partir du début de l'ère industrielle, les services entretien sont alors une sous-fonction de la production. Souvent excentrés dans l'entreprise, ils reposent sur des métiers : dépanneurs mécaniciens, dépanneurs électriciens, graisseurs et régleurs travaillent séparément et sont souvent en conflit avec les « producteurs/destructeurs » de machines (tu casses, je répare) !

L'entretien consistait majoritairement à dépanner et à réparer après défaillance, avec le souci d'un redémarrage rapide, en n'ayant comme objectif préventif que le minimum vital : lubrification et rondes de surveillance. L'image de l'entretien est donnée par le dépanneur auprès de sa machine démontée. L'image de la maintenance pourrait être celle d'un agent des méthodes réfléchissant au moyen de ne plus avoir à dépanner !

Il est honnête de dire que ces actions d'entretien étaient alors, et sont encore parfois justifiées par la nature technique des équipements peu intégrés, par la faible incidence économique des arrêts fortuits et par les méthodes de production en usage (avec la présence de stocks tampons en particulier). Toutefois, « vérité d'hier n'est pas celle de demain… ».

L'enjeu des années post-1980 était de pouvoir sortir du cercle vicieux de l'entretien, caricaturé par la boutade : « plus il y a de pannes, plus je cours, plus je cours, plus il y a de pannes ».

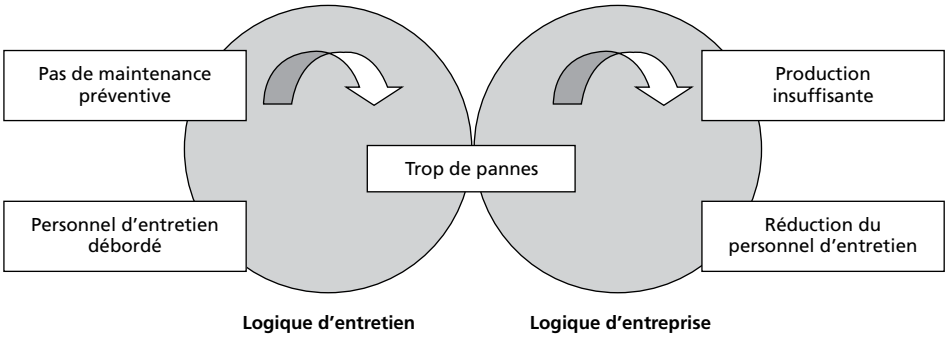


Figure 1.1 – Les cercles vicieux de l'entretien

☐ Les premiers secteurs concernés par la maintenance (avant 1980)

La structuration des services « maintenance » s'est fondée sur des concepts et des méthodes radicalement en rupture avec les usages de l'entretien. Le besoin émergent qu'il était impératif de satisfaire était la sécurité. Sécurité des exploitants, mais aussi des usagers et des utilisateurs. Il est donc naturel que les initiateurs de la maintenance aient été des domaines à risque, tels que :

– les transports : rail, marine et aéronautique,

– la pétrochimie,

– le nucléaire.

Pour les responsables de ces domaines, entretenir le matériel en subissant son comportement devenait inadapté face aux risques encourus : il leur fallait apprendre à maîtriser ces systèmes automatisés, à prévenir les incidents pour éviter les accidents, tout en évitant des surcoûts prohibitifs.

Il faut remarquer qu'avant 1980, ces expériences de structuration de la maintenance se faisaient dans une logique sectorielle, le cloisonnement entre entreprises étant fort.

☐ La phase de structuration (les années 1980)

Au début des années 1980, la France a eu la volonté, avant ses partenaires européens, de structurer et de normaliser les activités relatives à la maintenance à partir d'une vision transversale de la fonction.

C'est en 1980 que le CNM (Comité national de la maintenance) a été constitué « transversalement » par le ministère de l'Industrie pour rassembler les différents acteurs de la maintenance dans une réflexion commune. Devenu en 1994 le CNMI, cet organisme a mis au point la « Charte de la maintenance industrielle » (voir § 1.1.6).

C'est à partir de 1979 que sortirent les premières normes de maintenance AFNOR de la série X 60, la norme générale relative à la fonction maintenance X 60 000 datant de février 1985. À partir de 1994, la volonté de normaliser les activités de maintenance toucha l'Europe, par les travaux du CEN (Comité européen de normalisation). Nous présenterons dans cet ouvrage les projets de normes CEN, particulièrement le projet WI 3196003 relatif à la terminologie.

C'est en 1980 que l'AFICE (chefs d'entretien, association crée en 1933) devint l'AFIM (Association française des ingénieurs et responsables de maintenance), qui regroupe aujourd'hui 1 600 membres issus de tous les horizons de la vie économique, ce qui permet d'échanger les expériences vécues pour une réflexion prospective commune.

C'est à partir de 1978 que furent ouvertes les premières formations de l'Éducation nationale dédiées à la maintenance (IUT et BTS). Conçues sur un modèle original fait de polyvalence, elles ont vocation à fournir les cadres de la fonction à tout secteur d'activité et ont fait la preuve de leur pertinence.

☐ Les moteurs de l'évolution actuelle

Les années 1980 virent les entreprises obligées de s'adapter à des marchés plus fluctuants et élargis, voire mondialisés. La réactivité aux marchés devint prépondérante, entraînant la mise en œuvre de concepts nouveaux concernant l'organisation

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

de la production aussi bien que l'organisation de la maintenance. C'est en particulier le cas de la « maintenance productive », importée du Japon à cette époque et adaptée à nos comportements et à nos règles.

À la même époque vint la recherche de la qualité : compétitivité par le meilleur ratio qualité/prix possible et la mise en place de l'assurance qualité. C'est à partir de 1987 que les premières entreprises furent certifiées ISO 9000. Cette assurance de la qualité concerne les services « maintenance » en structurant leurs méthodes et procédures. Les normes ISO 14000 représentent depuis 1996 un nouveau défi, mettant la maintenance de l'outil industriel au service de la productivité dans le respect de l'environnement.

À partir de 1980 se mit également en place la production « juste à temps » associée à la recherche du zéro défaut et du zéro panne. Chacun de ces objectifs a alors impliqué une mise en place d'un service maintenance qui était bien autre chose qu'un « badigeonnage » de l'entretien ! Il faut d'ailleurs remarquer que chercher à atteindre le zéro stock et le zéro délai sans avoir avant la maîtrise du système productif serait suicidaire ! Des entreprises disparues s'y sont risquées…

La performance industrielle passe aujourd'hui par une convergence d'objectif entre la production et la maintenance : accroître la capacité de réponse de l'entreprise, donc de l'outil de production, en terme de quantité, de qualité, de coûts et de délais. Pour répondre à l'innovation technique, il a fallu innover dans les domaines de l'organisation et du social. Il a fallu transférer les concepts ayant fait la preuve de leur efficacité dans les grands groupes industriels vers de nombreuses PME/PMI.

À partir de 1990, c'est l'ouverture vers les activités tertiaires. Les méthodes de la maintenance industrielle sont alors transférées vers les groupes d'assurance, les groupes commerciaux, les hôpitaux. Il est ainsi légitime (et obligatoire) de maintenir les équipements de sports d'hiver, exemple pris loin des grandes usines. Sont ainsi apparus les termes de maintenance immobilière et de maintenance hospitalière. Dans tous ces domaines, les savoir-faire industriels sont adaptés en terme de maîtrise économique et technique des matériels et même des infrastructures.

Pour ne pas avoir à conclure cette rapide histoire de la maintenance, rappelons notre avant propos : « La maintenance n'est pas une destination, c'est un voyage ! »

☐ Les contraintes de la mondialisation, les années 2000

Ces années présentent des situations contrastées selon les entreprises : celles qui sont soumises aux contraintes de rentabilité à court terme sous la pression des actionnaires et les autres - essentiellement des entreprises familiales - qui continuent dans la tendance des années 1990.

Les entreprises soumises aux contraintes de rentabilité à court terme sont également sous la menace de délocalisation vers des pays à faible coût de main-d'œuvre. Les responsables techniques soumis à la pression du court terme et qui n'ont pas anticipé en organisant, optimisant leurs ressources et ne sont pas devenus partie prenante de l'effort productif subissent une pression accrue des services financiers tentés par des mesures drastiques qui s'inscrivent souvent dans le court terme.

Un autre défi de ces années est la désaffection des jeunes pour la technique qui se révèle au moment des massifs départs en retraite des seniors.

L'intensification de ces pressions amène une recrudescence des achats de GMAO laquelle permet des améliorations rapides, mais seulement si elle va de pair avec un projet d'amélioration cohérent.

Ces années voient également une redéfinition des relations avec la sous-traitance, relations qui vont vers plus de partenariat, plus d'obligations de résultats et un souhait de conserver la maîtrise technique.

1.1.3 Définitions AFNOR et CEN de la maintenance

❑ **Remarque préalable**

L'AFNOR faisant partie du CEN, les définitions AFNOR seront supplantées par les définitions CEN lorsque les normes « projet » deviendront définitives.

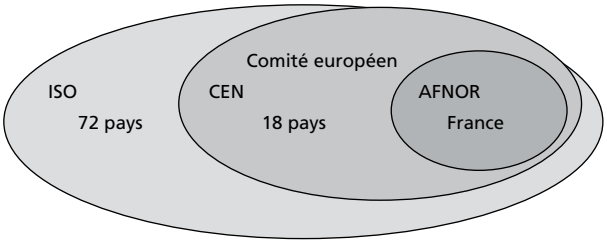


Figure 1.2 – Les organismes de normalisation

Il n'existe pas actuellement de normes internationales ISO (International Standardization Organization) relatives à la fonction maintenance.

❑ **Définitions AFNOR X 60-000 (mai 2002) et commentaires**

Définition

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Commentaires

Notons que les actions de maintenance ne sont pas seulement techniques : l'action technique est encadrée, pilotée par des actions de gestion (économie et administration) et de management, ce qui implique une large polyvalence.

Le terme « maintenir » contient la notion de surveillance et de prévention sur un bien en fonctionnement normal. Le terme « rétablir » contient la notion de correction (remise à niveau) après perte de fonction.

La « sûreté de fonctionnement » est définie dans la norme NF EN 60300-1 comme étant le terme collectif qui décrit la disponibilité d'un produit simple ou complexe. Les facteurs qui influencent la disponibilité d'un produit sont les caractéristiques de conception de la fiabilité et de la maintenabilité, ainsi que la logistique de maintenance. Nous la noterons SdF.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

1.1.4 Différentes formes de maintenances : définitions

❑ **Vocabulaire (FD X 60-000)**

Maintenance préventive : « Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien, elle est subdivisée en :

– *Maintenance conditionnelle* : Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent.

> **Remarque**
>
> La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue. »

– *Maintenance prévisionnelle* : Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

– *Maintenance systématique* : Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

– *Maintenance corrective :* (anciennement curative) : Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. »

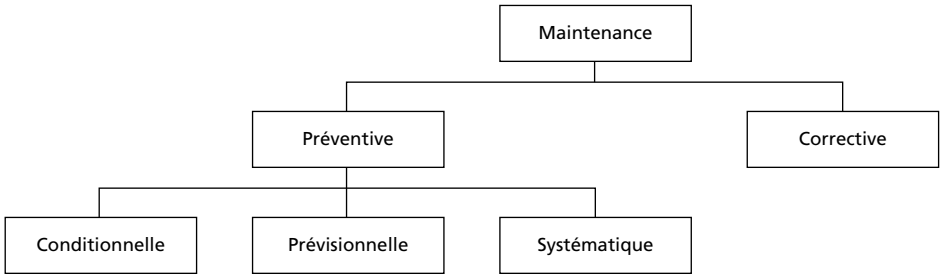


Figure 1.3 – Les différentes formes de maintenance normalisées selon FDX60.000

L'auto maintenance est une forme de maintenance particulière : « Certaines actions de maintenance ou préalables à des actions de maintenance de niveau 1 peuvent être réalisées par le personnel d'exploitation ».

❑ **Autres termes non normalisés caractérisant des formes de maintenance**

Les termes étudiés dans ce paragraphe concernent des applications non normalisées du mot « maintenance », ou peu utilisées ou très spécifiques ou étrangères.

La *maintenance réparatrice* est la forme ancienne et universelle de la maintenance corrective, déclenchée par une défaillance. Mais elle ne contient pas la dimension « saisie pour analyse ultérieure », caractéristique de la maintenance corrective : corriger, c'est améliorer.

La *maintenance palliative* caractérise les actions de dépannage : remise en état provisoire.

La *maintenance corrective* caractérise les actions de réparation au sens de « guérir ».

La *maintenance d'amélioration* est à nos yeux un pléonasme : par nature, la maintenance s'inscrit dans une démarche de progrès. Toute l'organisation tend à favoriser le diagnostic, générateur d'améliorations par rupture avec l'entretien traditionnel. Rappelons que, pour le CEN, « l'amélioration est l'ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise ».

La *maintenance ab initio* se rapporte aux actions effectuées en amont de la mise en service d'un équipement et destinées à faciliter la maintenance ultérieure. Ces actions ont lieu dès la conception (prise en compte de la maintenabilité, construction de la fiabilité), au niveau des « travaux neufs » ou de la négociation d'investissement (éléments de soutien, documentation, etc.).

La *maintenance proactive ou détective* (terme émergent) repose sur l'exploitation du retour d'expérience et sur l'analyse approfondie des phénomènes pathologiques à l'origine des défaillances.

La *maintenance rationnelle* est un terme défini par J. Maxer comme « l'ensemble des actions et des réflexions permettant de rétablir et d'améliorer la qualité et la fiabilité des biens et des services ».

Télémaintenance : maintenance exécutée à distance sans accès physique du personnel au bien.

Maintenance en ligne : maintenance exécutée alors que le bien est en fonctionnement.

❑ Les formes de maintenance dans les autres pays industrialisés

La *maintenance productive* est la forme de maintenance américaine ayant servi de base, dans les années 1970-1980, à la TPM.

La *maintenance productive totale*, ou TPM, est une marque déposée par JMA (Japan Management Association). Elle a été un vecteur du succès japonais des années 1980. Remarquons que la TPM a été « réimportée » aux États-Unis pour contrer l'importation massive des produits japonais. C'est vers 1982 que des groupes américains implantés en France ont cherché à adapter les concepts de la TPM à nos entreprises. Le paragraphe 10.2 lui est entièrement consacré.

La *topomaintenance* est une francisation de la TPM, marque déposée par SOLLAC (sidérurgie) à Fos vers 1975. Elle s'inscrit dans une démarche de qualité totale, tous les acteurs étant concernés par le rendement maximal des équipements tout au long de leur cycle de vie

La *logistique*, concept américain, est une approche économique impliquant la maintenance et reposant sur l'optimisation du LCC *life cycle cost* (coût du cycle de vie) d'un équipement.

La *térotechnologie* est une forme anglaise de la maintenance : c'est la maintenance préventive *plus* la maintenance proactive.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

1.1.5 Facteurs favorisant l'émergence du besoin de maintenir

Nous avons vu que la maintenance n'est pas une fin en soi, mais la réponse à l'émergence d'un besoin. D'où vient ce besoin ? Au niveau de l'entreprise, la recherche de réactivité, de qualité et de productivité est un objectif « moteur » rendant obligatoires et accompagnant les mutations de la maintenance comme de la production.

D'autres facteurs peuvent accélérer le passage de l'entretien à la maintenance :

– la sensibilisation des décideurs aux économies et aux gains de performance que l'on peut espérer d'une maintenance optimisée du parc. Or tous ne sont pas également sensibilisés !

– le potentiel d'investissement de l'entreprise, qui favorise la dotation en équipements cohérents en disponibilité propre et qui donne les moyens de préserver cette disponibilité ;

– la nature du parc à maintenir : des équipements homogènes, dont les technologies sont standardisées, de conception modulaire, se prêtent mieux à la maintenance qu'un parc disparate ;

– l'automatisation des process, bien sûr, intégrant des technologies diverses dans un environnement informatisé ;

– la criticité d'un matériel, sur le plan de la sécurité ou des coûts indirects engendrés par une défaillance. Deux matériels identiques peuvent être l'un critique, l'autre non, suivant leur position dans le process ;

– la présence de techniciens acceptant le travail en équipe polyvalente, prêts à prendre des initiatives en temps réel et à participer à des démarches « diagnostic » ;

– l'embauche de jeunes techniciens formés dans l'état d'esprit « maintenance » ;

– certains aspects réglementaires peuvent favoriser la structuration d'un service maintenance. Il en est ainsi de façon caractéristique pour la maintenance hospitalière (par l'accréditation des établissements et l'organisation du réseau de matériau-vigilance, par exemple).

Ces facteurs sont bien sûr interdépendants, la performance résultant aussi bien des hommes que des matériels et de leur environnement.

Lorsque ces facteurs n'existent pas, il est légitime de rester dans une logique d'entretien traditionnel. Il en est encore ainsi pour des PME de structure manufacturière, produisant en petites séries avec un parc de machines diversifiées, sans contraintes de sécurité majeure et pour lesquelles la panne fortuite est admissible.

C'est ce que le poète Henri Michaux exprimait ainsi : « Quand les autos penseront, les Rolls Royce seront plus angoissées que les taxis. »

1.1.6 Annexe : la Charte de la maintenance industrielle (CNMI 1993)

Afin de contribuer à la qualité du service en maintenance industrielle et en accord avec les exigences des normes ISO 9000, le CNMI propose aux entreprises, à leurs fournisseurs et à leurs sous-traitants, d'adhérer à la Charte de la maintenance industrielle. Cette adhésion implique pour les entreprises signataires de respecter un certain nombre de principes dans les domaines techniques, organisationnels, commerciaux et légaux. Cette adhésion est constituée des dix engagements suivants.

1. Maîtriser les techniques et méthodologies nécessaires à son métier.
2. Disposer d'une organisation et d'une polyvalence technique lui permettant de traiter les interfaces technologiques nécessaires à l'exécution des tâches qu'elle a acceptées.
3. Respecter et faire respecter les normes et réglementation en vigueur, promouvoir celles ayant trait à la maintenance et participer à l'évolution des textes normatifs dans son métier.
4. Mettre en œuvre des actions de maintenance tenant compte des contraintes de sécurité et d'environnement et refuser d'entreprendre toute action conduisant au non-respect des textes officiels et des lois en vigueur.
5. Mettre en œuvre des actions de maintenance tenant compte des contraintes d'exploitation spécifiques du client.
6. Fonder ses relations commerciales sur des pratiques contractuelles préalablement déterminées et précisant clairement les partages de responsabilité.
7. Rechercher avec le client la politique de maintenance optimale en fonction de ses impératifs d'exploitation et de ses exigences de qualité.
8. Respecter les principes de confidentialité et de réserve vis-à-vis de ses clients.
9. Développer conjointement avec le client des actions visant la transparence des opérations et la maîtrise des risques.
10. Assurer à son client le retour d'expérience et le conseiller sur les modifications susceptibles d'améliorer les performances, la fiabilité et la sûreté de fonctionnement des équipements et la rentabilité des systèmes de production. L'inciter à actualiser leur mise en conformité avec les normes, règlements et législation en vigueur.

1.2 Le service maintenance au sein de l'entreprise

1.2.1 Réflexion préliminaire : qui fait de la maintenance ?

Nous prendrons dans cet ouvrage comme structure de référence le « service maintenance intégré » au sein d'une entreprise (figure 1.4). En effet, ce cadre organisationnel est le plus complet et le plus exigeant : la plupart des méthodes développées dans un service de maintenance interne peuvent s'adapter aux autres activités concernées par la maintenance : prestataires de service, services après vente (SAV) ou maintenance immobilière.

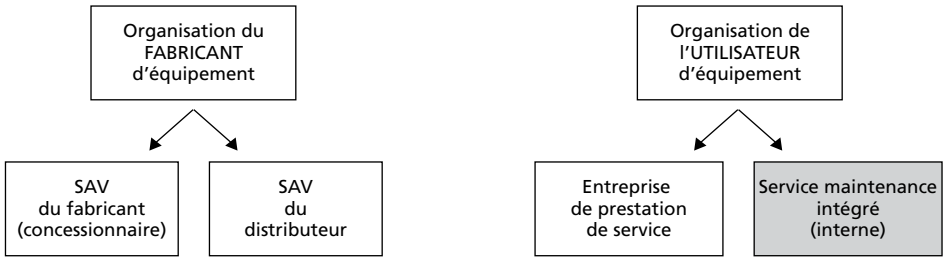


Figure 1.4 – Qui est concerné par la maintenance ?

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

1.2.2 Les missions du service maintenance intégré

❑ Missions principales

Nous pouvons caractériser la mission globale de la maintenance par la gestion optimisée du parc matériel en fonction des objectifs propres à l'entreprise. La maintenance est ainsi en prise directe avec la stratégie de l'entreprise à un moment donné. Pour exemple, une ligne de production ne sera pas prise en charge avec le même soin préventif selon qu'elle est requise à sa capacité maximale de production, ou qu'elle n'est requise que de façon intermittente. D'où la nécessité de dégager une politique de maintenance :

– conforme aux textes réglementaires,
– assise sur le soutien à la production (quantité, qualité et délais),
– intégrée à l'amélioration de productivité,
– assurant la sécurité des biens et des personnes,
– assurant l'amélioration de l'environnement interne et le respect de l'environnement extérieur.

Nous pouvons synthétiser les missions de la maintenance en les plaçant sur trois plans interdépendants.

Au plan technique :

– accroître la durée de vie des équipements,
– améliorer leur disponibilité et leurs performances.

Au plan économique :

– réduire les coûts de défaillance, donc améliorer la productivité et les prix de revient,
– réduire le coût global de possession de chaque équipement sensible.

Au plan social :

– réduire le nombre des événements « fortuits », car moins d'interventions en urgence réduit le risque d'accidents,
– revaloriser la nature du travail : équipe, polyvalence, qualité, initiatives, anticipation, etc.

Responsable de l'état et de la conservation du matériel, la maintenance ne peut imposer sa vision à long terme que si elle n'est pas en état de dépendance (hiérarchique et budgétaire) par rapport à la production.

❑ Actions correspondantes

La première action du service est donc de déterminer, à partir de l'inventaire du parc à maintenir, la criticité de chacun des équipements. Par défaut. C'est-à-dire par l'importance supposée de la perturbation générée par la défaillance intempestive d'un équipement. Suivant un critère de sécurité d'abord, puis économique : il y aura arrêt de production ou non. Il faut ensuite « proportionnaliser » l'effort de prise en charge (documentation technique y comprise) à cet indice de criticité.

Il appartient ensuite au service de préparer et de réaliser des actions :

– en temps réel : surveillance du fonctionnement, traitement des alarmes,

– à court terme : propreté, inspections et actions correctives (dépannages),
– à moyen terme : actions préventives, révisions, actions externalisées, améliorations et modernisations,
– à long terme : grands arrêts, participation aux « travaux neufs » et à la caractérisation des nouveaux équipements.

❑ **Autres missions éventuelles**

Outre les équipements de production, les services maintenance ont souvent la responsabilité des « utilités », en particulier la fourniture des énergies, dont la criticité est également à estimer.

Parmi les autres activités qui peuvent « tomber dans l'escarcelle » du service, citons :
– l'entretien général des infrastructures, des espaces verts, des véhicules,
– des prestations diverses pour tout service de l'entreprise,
– les travaux concernant l'hygiène, l'ergonomie, la sécurité, l'environnement, etc.

Ce qui prouve l'utilité de codifier ces différentes activités « auxiliaires » pour distinguer leurs coûts à l'intérieur du budget du service.

1.2.3 Les interfaces de la maintenance

❑ **L'interface maintenance/production**

L'interface maintenance/production est le plus délicat à définir par son rôle stratégique au cœur du système de production. Il caractérise le niveau d'évolution de l'organisation de ce système.

Reprenons son évolution à partir de la phase « entretien traditionnel » (figure 1.5). Ce schéma illustre la subordination des services « entretien » à la « production ». Dans ce cas, le responsable de production risque d'imposer sa vision à court terme de l'utilisation des matériels : il tolère la lubrification, il est bien obligé de subir les arrêts fortuits, mais il repousse à plus tard toute programmation d'arrêt préventif. Il est également maître du budget de l'entretien, qui coûte cher, comme chacun sait.

Cette dépendance peut devenir un partenariat si la maintenance travaille dans un esprit « centre de profits » plutôt que « centre de coûts ». Dans le premier cas on cherche à être le moins cher possible dans le strict cas d'un budget (mais les pannes respectent-elles le budget ?) dans le second cas on fait des propositions d'amélioration basées sur le gain en productivité réalisable et exprimé en euros.

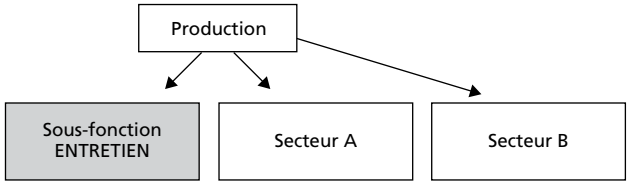


Figure 1.5 – Organigramme de l'entretien traditionnel

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

L'organigramme de la figure 1.6, plus évolué, permet de résoudre les problèmes précédents liés à la subordination de l'entretien.

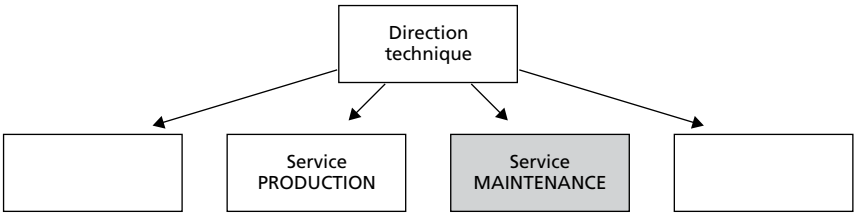


Figure 1.6 – Organigramme « maintenance indépendante »

Par contre, cette organisation ne résout pas les problèmes « en temps réel » situés « au pied de la machine ». C'est ainsi que les opérateurs (ou conducteurs) et régleurs de la production, les contrôleurs de la qualité, les dépanneurs de la maintenance doivent, face à un incident, décider du « qui prend ? ». Perte de temps, source de conflits, retours d'expérience difficiles, etc. Or, preuve est faite qu'il est plus positif de chercher des causes et d'y apporter des remèdes que de chercher des responsables, a fortiori des coupables !

La TPM (*total productive maintenance*) apporte une réponse à ce problème de partage des tâches dites de « premier niveau ». Nous la développerons dans le paragraphe 10. 2 du chapitre 10, sur les nouvelles organisations.

❑ Les autres interfaces

Le service maintenance est en relation interne avec :

– la Direction technique : politique et grands projets à mettre en œuvre,
– la Direction financière : budgets de fonctionnement et d'investissement,
– la Direction du personnel (DRH) : personnel interne et renforts, sécurité,
– les Achats : approvisionnements, contrats externes,
– les Études : implantations, améliorations « lourdes », travaux neufs lorsqu'ils ne sont pas regroupés au sein du service,
– le Magasin (lorsqu'il est centralisé) : fournitures des rechanges et consommables,
– le Service qualité, s'il est séparé de la production.

Le service maintenance a également des relations externes avec ses fournisseurs, ses prestataires et avec ses fournisseurs d'équipements techniques (commerciaux et SAV).

Remarque

Face aux contraintes économiques et à la nécessité d'accroissement de la productivité, de nombreuses PME ont supprimé la poste de magasinier voir d'acheteur. Ce calcul à court terme sous la pression des actionnaires - qui confondent productivité et réduction du personnel - ne supprime pas le besoin. Si la réponse à ce besoin n'est pas remplie par une entreprise extérieure spécialisée dans la logistique maintenance, cela revient à répartir la charge de travail du magasinier entre les techniciens et souvent les ingénieurs de maintenance.

Cette énumération succincte des différentes interfaces prouve que le technicien de maintenance doit être un homme « de contact ». Elle montre aussi l'importance opérationnelle de la définition des procédures de communication interfonctions.

1.2.4 Analyse d'un organigramme fonctionnel

❑ Définition et intérêt d'un organigramme

Un organigramme est une représentation schématique de la structure, le plus souvent pyramidale, d'une entreprise ou d'un service mettant en évidence les domaines de responsabilité de chaque composant. Il répond à la question « qui fait quoi ? » et il illustre verticalement la hiérarchie des hommes (modèle militaire) ou des fonctions (modèle industriel). Un autre intérêt est de « borner » les domaines d'action de chaque responsable de « pavé », évitant ainsi les chevauchements et les luttes d'expansion d'influence (certains hommes ayant tendance à être «boulimiques»).

Toute réorganisation profonde implique une modification d'organigramme. Ainsi, nous pourrons dire qu'un organigramme rationnel est une condition nécessaire, mais non suffisante, à la réalisation d'une maintenance efficace.

Remarques

1. Le management par « projet » se fait souvent en « détachant » provisoirement des gens de leur pavé d'origine. Il en est de même pour les « cercles de progrès ». Il n'est pas souhaitable de confier la réalisation complète des projets d'audit ou d'organisation à des stagiaires inexpérimentés laissés seuls et ne connaissant pas l'entreprise. Ils doivent bien au contraire être dirigés et encadrés par le responsable de maintenance.
2. L'organigramme n'a pas vocation à préciser les flux de communication entre services.
3. Le fait que deux services soient « à l'horizontale » ne donne aucune indication sur leurs effectifs respectifs.

❑ Analyse critique d'un organigramme

Prenons pour exemple un organigramme « classique » d'une entreprise de 600 personnes, avec 4 secteurs de production et 60 personnes affectées au service maintenance (figure 1.7).

Commentaires

1. Il est essentiel que les fonctions production et maintenance soient « à l'horizontale». Une interface hiérarchisée entraîne une subordination incompatible avec l'objectif de préservation du matériel à long terme de la maintenance.
2. Une antenne sectorisée est constituée d'une équipe polyvalente de maintenance « pilotée » par un agent des méthodes affecté à un secteur de production. Cette décentralisation permet une réduction des temps d'intervention ainsi qu'une bonne maîtrise des technologies. L'agent des méthodes assure la cohérence des méthodes avec les autres secteurs et avec la politique générale menée.
3. L'antenne sectorisée a une composition adaptée au secteur. Par exemple : 1 chef d'équipe + 1 électronicien + 2 hydrauliciens + 1 mécanicien + 1 tuyauteur.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

La structure empirique « service élec » et « service méca » est incompatible avec des interventions rapides sur des matériels à technologies multiples. C'est au niveau des antennes que l'esprit d'équipe polyvalente doit se substituer à l'esprit corporatif !

4. L'organisation de la fonction « ordonnancement » est trop souvent négligée : outre la planification des travaux, elle doit permettre de lancer, à une heure H, une intervention avec tous les moyens mis à disposition du chef d'équipe. Un gain de temps et d'énergie (chercher à rassembler les moyens !) considérable.

La suite de l'ouvrage sera l'occasion de développer ces différents arguments.

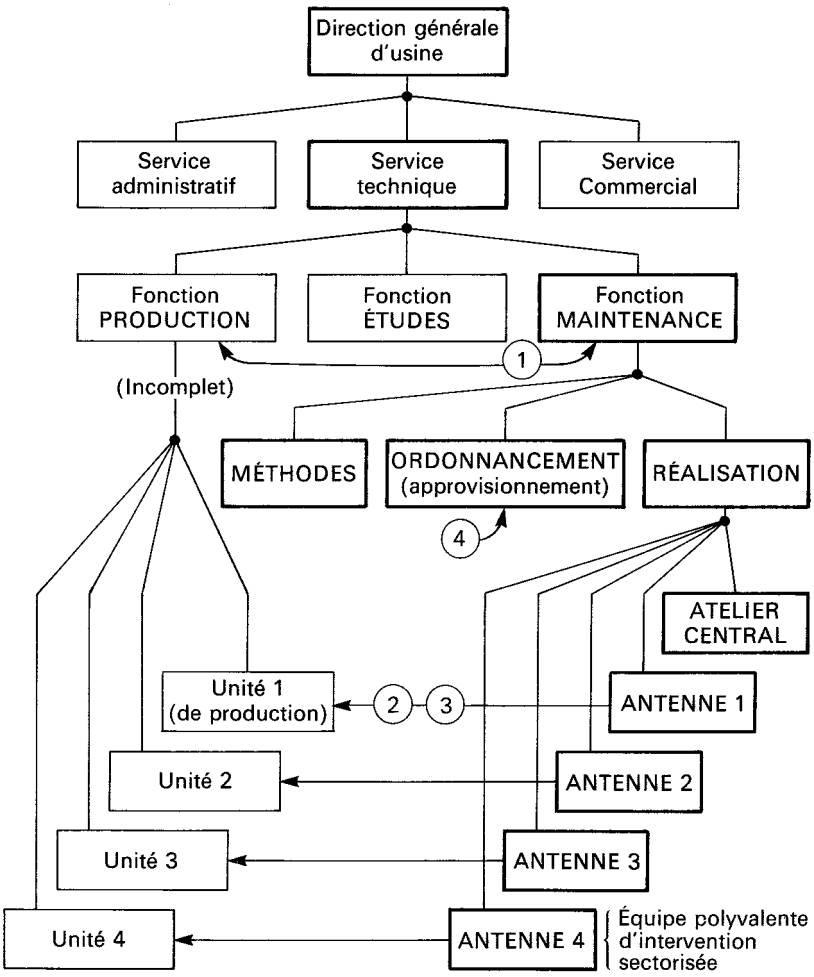


Figure 1.7 – Exemple commenté d'organigramme fonctionnel

1.2.5 Que faut-il centraliser ou décentraliser en maintenance ?

Ces questions sont souvent plus faciles à résoudre *in situ* en fonction de l'histoire, de l'implantation et du secteur d'activité d'une entreprise donnée que dans un ouvrage général. Cependant, quelques idées directrices peuvent étayer une réflexion d'adaptation locale.

❑ **Centralisation de la gestion**

Elle doit permettre la cohérence d'un ensemble d'activités diversifiées, éparpillées sur le site, opérées par des hommes de qualifications différentes.

Cette centralisation est matérialisée par le bureau des méthodes, centre vital du service, mais aussi par l'existence d'un atelier central de maintenance regroupant les moyens « lourds » nécessaires. Elle doit faciliter :

– l'optimisation de l'emploi des moyens nécessaires aux activités et l'assistance technique,
– le retour d'expérience, et donc une meilleure maîtrise des temps opératifs et des coûts passés,
– le retour d'expérience, et donc un suivi homogène des équipements et de leurs défaillances,
– une standardisation des procédures et des flux de communication interne,
– une meilleure gestion du personnel.

Notons que l'existence d'une GMAO assure la centralisation de la gestion.

❑ **Décentralisation topographique**

La base de cette décentralisation est la sectorisation des antennes de maintenance à proximité immédiate des équipements dont ils ont la charge. Elle doit faciliter :

– la délégation de responsabilité aux chefs d'équipe et l'autonomie d'équipes polyvalentes réduites,
– l'efficacité et la rapidité des actions correctives (dépannages en particulier),
– les relations avec les « producteurs » (conducteurs d'installation, régleurs, etc.).

❑ **Le problème du « magasin »**

La localisation du « magasin de maintenance », comprenant les stocks de consommables et de pièces de rechange est discutée.

Vaut-il mieux intégrer ce magasin à un magasin général de l'entreprise, donc centraliser en augmentant les distances aux lieux d'intervention ?

Ou est-il préférable de multiplier des dépôts à proximité des antennes associés à un magasin spécifique implanté dans l'atelier central de maintenance ?

Dans le passé on centralisait les achats et le magasin sous une direction logistique, et on retrouve toujours cette structure dans les grandes entreprises. Dans les PME plus ou moins importantes on place les stocks et parfois les achats sous l'autorité de la direction technique ou direction de production. Cela limite les inconvénients du cloisonnement interservices et permet de mieux appréhender une gestion en flux tendu.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

1.3 Les hommes de maintenance et leur formation

1.3.1 Quelques remarques préliminaires

❑ De l'entretien à la maintenance

Aux mutations technologiques doivent répondre de nouvelles organisations et des adaptations de compétences.

Aux qualifications devenues obsolètes doivent se substituer des métiers nouveaux. Autour des outils de production doivent être expérimentés des profils de compétence dont il faut imaginer les caractéristiques et même les noms ! Par exemple, les « pilotes, opérateurs, surveillants ou conducteurs » d'installation, etc.

Les services entretien se caractérisaient par un taux d'encadrement faible (cadres et maîtrise) et de nombreux ouvriers spécialisés organisés en ateliers corporatifs (électriciens, mécaniciens, chaudronniers, etc.). Ce corporatisme originel a fait la preuve de son inadaptation face à l'intégration technologique des systèmes actuels, et surtout face aux logiques de commande et à l'omniprésence de l'informatique. Ces systèmes demandent une plus grande réactivité, plus de vigilance, plus de polyvalence de la part des équipes.

Dans un service maintenance, l'organigramme montre le besoin en agents de maîtrise, techniciens des méthodes en particulier, s'appuyant sur une polyvalence large pour pouvoir gérer les actions techniques. À la base, c'est sur les conducteurs d'installation que reposent les interventions de premier niveau. Ils sont assistés par des équipes d'intervention de maintenance composées de spécialistes à forte technicité et de compétences décloisonnées (exemple : omniprésence de l'automatisme et de l'informatique industrielle).

Le métier a donc été considérablement revalorisé, aussi bien par les qualités comportementales requises que par les outils à utiliser (GMAO, testeurs, contrôles non destructifs, télésurveillance, etc.). De façon un peu moins sensible qu'en production, l'évolution se fait dans le sens d'une perte quantitative de main-d'œuvre peu formée. Mais la demande en personnel de culture technique spécifiquement formé à la maintenance est grandissante afin de satisfaire les besoins en animation, méthodes et gestion.

❑ La nécessaire polyvalence pour tous

La maintenance est une fonction technique. Mais pas seulement.

À tous les niveaux de responsabilité d'un service, la maintenance se caractérise par une nécessaire polyvalence, le « fait technique » devant systématiquement être piloté par une réflexion économique et sécuritaire. La culture d'origine doit être incontestablement technique ; mais ce technicien doit apprendre à gérer, à animer, à informer, parfois à former ou à négocier.

Au niveau des techniciens d'intervention, cette polyvalence est requise par la forte intégration technologique que l'on trouve dans tous les systèmes évolués. La seule localisation d'une panne exige de transgresser les frontières entre les parties opératives, les commandes et leurs interfaces. Entre les domaines de la mécanique, de

l'hydraulique, de l'électronique, des automatismes et de l'informatique de commande. Un domaine comme la « connectique », situé hors des apprentissages traditionnels, représente un champ de connaissance incontournable pour le dépanneur de maintenance, car c'est une source fréquente de microdéfaillances.

Comme il est irréaliste de savoir tout sur tout, c'est par le travail en équipe que la complémentarité des compétences résoudra les problèmes du terrain.

❑ **Les « risques du métier »**

La maintenance est d'une nature « ingrate ». Répondant à des besoins de sécurité, de protection de l'environnement, de soutien à la production, ses succès apparaissent « naturels » alors que ses quelques échecs sont criants.

La prévention des pannes ? Mais qui saura que vous avez aujourd'hui prévenu une panne, et économisé le coût de ses conséquences, puisqu'elle n'est pas arrivée ! À l'inverse, comment expliquer que le « correctif résiduel » d'une politique préventive est inévitable en terme de risque maîtrisé, mais non nul. Et donc que la panne qui arrive « au mauvais endroit et au mauvais moment » avait une probabilité d'occurrence faible, mais non nulle !

Il est donc particulièrement important en maintenance de savoir justifier une mesure préventive, et de savoir faire la preuve de son efficacité (graphes d'évolution, par exemple).

1.3.2 Les métiers de la maintenance

❑ **Le responsable du service**

Souvent ingénieur généraliste, il est peut-être issu de la promotion interne, car le poste exige une bonne connaissance du terrain (organisation, environnement, ressources humaines et matérielles), mais aussi de la pathologie des équipements sensibles. Outre la responsabilité classique de la gestion et de l'animation d'un service technique, le poste présente plusieurs aspects particuliers.

– Le « contrôle de gestion » : l'exigence en matière de maîtrise économique des activités du service devient de plus en plus rigoureuse. Une aide extérieure peut être nécessaire à assurer cette fonction.
– La « veille organisationnelle » : la maintenance étant très évolutive, il lui faudra s'ouvrir aux organisations mises en œuvre « ailleurs », en Europe et au-delà. Pensons à la TPM et à la MBF et rappelons que la maintenance se fait avec des hommes, et que l'efficacité du travail de ces hommes dépend de l'organisation dans laquelle ils s'insèrent.
– Le management de « projets » : le chef de service sera souvent associé ou maître d'œuvre dans le management d'un ou de plusieurs projets concernant la maintenance (TPM, supervision, GMAO, ISO 9000 ou 14000, etc.).

❑ **L'ingénieur « Études et travaux neufs »**

Légitimement rattachés à la maintenance, les techniciens des « travaux neufs » ont pour mission de définir, puis de mettre en place et de démarrer les nouveaux équipements, ainsi que la logistique et tous les réseaux s'y rapportant.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Attentifs à la maintenabilité, à la logistique de soutien et à la sûreté de fonctionnement (SdF), exploitant les retours d'expérience, ils rendront plus facile et plus efficace la maintenance ultérieure de ces équipements. Leur rôle devient prédominant : bien mieux que les actions a posteriori (le correctif), mieux que les actions a priori (le préventif), les actions *ab initio* représentent un gisement d'économies à développer.

❑ Le technicien du bureau des méthodes de maintenance

Le bureau des méthodes est au centre des activités de la maintenance. Les agents des méthodes ont pour missions principales :

– l'exploitation des retours d'expérience en temps, en coûts et en analyse qualitative des défaillances, ces retours devant être partagés avec le terrain,

– l'amélioration des performances des équipements et des intervenants,

– la préparation des actions préventives ou correctives, ce qui implique en amont la gestion de la documentation technique, en aval la maîtrise logistique associée à ces actions.

Pour effectuer toutes ces tâches, ces agents sont « sectorisés », chacun d'entre eux étant amené à être très présent sur son site de rattachement en soutien des intervenants. À la différence des « méthodes de production », le préparateur ne peut définir son travail qu'*in situ*, par observation et dialogue, avant de le matérialiser au bureau des méthodes.

Les techniciens supérieurs en maintenance formés en IUT et en BTS ont vocation à devenir, après une période d'adaptation au terrain, des agents des méthodes.

❑ Le technicien d'intervention de l'antenne de secteur

Une forte technicité adaptée aux technologies du secteur est requise pour ces techniciens travaillant en équipe. Surveillance, dépannages et réparations, mise en œuvre d'amélioration et d'actions préventives, ils sont amenés à former et à soutenir les opérateurs en automaintenance, le cas échéant.

❑ Le technicien de l'atelier central

Nous retrouverons ici les « vieux métiers » de l'entretien : tourneurs, soudeurs, tuyauteurs, ajusteurs, chaudronniers, mais aussi électriciens, automaticiens, etc. Ils sont chargés de la remise à niveau d'équipements « déposés » à l'atelier central. Le magasin de maintenance fournit les moyens nécessaires aux différentes spécialités.

❑ Autres métiers parfois rattachés à la maintenance

Suivant la taille de l'entreprise et la nature de ses activités, les spécialités suivantes peuvent être rattachées au service maintenance :

– responsable des « utilités » (énergies, réseaux, stations d'épuration, etc.), des « services généraux », de l'entretien des bâtiments et espaces verts, etc. ;

– responsable de la sécurité, des conditions de travail, de l'environnement, etc. ;

– responsable des supports techniques SAV ;

– responsable GMAO et autres logiciels spécifiques (basé au bureau des méthodes).

Notons deux autres métiers de la maintenance, le plus souvent exercés à l'extérieur de l'entreprise :

– l'ingénieur-conseil en maintenance, expert en organisation et/ou en informatique de maintenance. Sa mission principale consiste à inspirer au management de l'entreprise des axes de changement d'organisation, à apporter une méthodologie du changement, puis à piloter la mise en œuvre du projet;
– le formateur en maintenance, intervenant dans des organismes de formation continue qui peuvent être privés (CEGOS), associatifs (AFNOR, AFIM, APAVE, CETIM, ADEPA, AFPA, CFPA, etc.), consulaires (CIMI) ou dérivés du public (GRETA et centres de formation continue de l'enseignement supérieur).

1.3.3 La spécificité française en matière de formation à la maintenance

❑ Le pari innovant de l'Éducation nationale

Dès 1978, la France s'est « singularisée » en Europe par des initiatives pionnières dans le secteur éducatif. L'Éducation nationale a alors su répondre aux besoins des entreprises en leur offrant une formation *transversale techniquement polyvalente* et enseigner *les méthodes de maintenance* comme discipline identifiée.

L'ouverture en 1978 à l'Institut universitaire de technologie (IUT) de Valenciennes d'un département Maintenance industrielle, suivie en 1980 par l'ouverture de sections de techniciens supérieurs en maintenance industrielle (STS) dans certains lycées techniques, répondait logiquement à une attente de certaines entreprises, mais correspondait à un pari original qui mérite d'être analysé avec le recul de vingt ans d'expérience, sachant que 4 500 jeunes techniciens supérieurs de maintenance intègrent chaque année les entreprises.

☐ Le pari de la transversalité

Certains pays européens avaient et défendent encore une vision « verticale », sectorielle ou corporatiste de la maintenance. Maintenance électrique, mécanique ou hydraulique. Maintenance papetière, agro-alimentaire ou pharmaceutique… Leitmotiv : « chez nous, c'est spécial… ».

Il s'ensuit des cloisonnements et des oppositions corporatistes, avérés par l'expérience comme autant de pesanteurs qui freinent la performance et la qualité. A contrario, le succès de la *maintenance productive totale* est dû à l'association des efforts cohérents de la production, de la qualité et de la maintenance dans une convergence d'objectifs.

L'Éducation nationale a dès l'origine fait le pari d'une formation décloisonnée, les jeunes ainsi formés pouvant a priori s'insérer dans tous les secteurs ayant à maintenir économiquement et efficacement un outil de production, de l'industrie automobile à la station de sport d'hiver… L'hypothèse initiale française repose sur une vision transversale de la fonction maintenance : « les concepts, les méthodes et les organisations de la maintenance peuvent s'appliquer à tous les secteurs, à des adaptations et à des effets d'échelle près ».

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Le niveau de formation à bac + 2 est apparu comme le plus propice à introduire de nouvelles compétences « méthodes » dans les entreprises. C'est ainsi que fut imaginé l'enseignement spécifique et inédit des méthodes de maintenance autour desquelles s'articulent toutes les compétences technologiques. En particulier a été introduite avec ces méthodes l'idée que tout « fait technique » est conditionné par une approche sécuritaire et économique.

☐ Le pari de la polyvalence

En IUT comme en STS maintenance industrielle, la volonté de la polyvalence a structuré les programmes d'enseignement, en contraste avec les formations spécialisées qui caractérisaient ces niveaux de formation.

Au niveau du recrutement, chaque formation est ouverte à une large palette de baccalauréats. Au niveau des enseignements, des cours et des travaux pratiques de gestion, de communication, de sécurité d'économie et de méthodes de la maintenance supportent les enseignements scientifiques et technologiques largement diversifiés : automatismes, électronique, mécanique, électrotechnique, thermique… Des stages chez des partenaires industriels ou tertiaires de tout secteur d'activité complètent cette volonté de polyvalence.

Dans les années 1980, nous pouvions douter, car cette polyvalence présentait un risque inhérent : celui de voir ces jeunes techniciens généralistes « barrés » sur le chemin de l'emploi par des « spécialistes » de même niveau. Avec plus de vingt années de recul, le doute n'est plus permis et le pari est gagné, au-delà du seul domaine de la maintenance : ces jeunes sont recherchés et intègrent de nombreux domaines connexes. Notons également que le concept IUT de formation à la maintenance, reconnu et validé en France, est exporté dans de nombreux pays en voie de développement (Maroc, Argentine, Mexique…).

❑ Quelques réflexions sur la formation à la maintenance

1. La compétence des techniciens et ingénieurs résultera de leur formation initiale complétée par l'alternance entre des périodes opérationnelles en entreprise et des périodes de formation continue. Ces périodes de perfectionnement seront, soit « pointues » pour approfondir un champ particulier, soit « généralistes » pour prendre de la distance par rapport au quotidien et réfléchir à l'application d'autres méthodes.

2. Une spécificité de l'apprentissage de la maintenance est l'importance du raisonnement inductif, qui part du concret (l'observation des faits sur le terrain) pour aller vers l'abstrait (la recherche des causes expliquant les faits). Cette « démarche diagnostic », évidemment transférable à la qualité et à la gestion, est caractéristique de l'état d'esprit maintenance.

3. Doit-on former des jeunes « à la maintenance », au risque de les enfermer dans la fonction, ou faut-il former des techniciens spécialistes et devoir les adapter à la fonction ? La réponse dépend du niveau envisagé : intervenant de terrain, agent de maîtrise ou cadre supérieur.

– Au niveau des « intervenants de terrain », la deuxième voie semble la mieux adaptée. La nécessaire polyvalence sera acquise sur le terrain à partir d'une base

technique identifiée (mécanique, électronique, etc.) et un management participatif accélérera l'acquisition de « l'état d'esprit maintenance ».

– Au niveau de la maîtrise, l'expérience est faite : à bac + 2, il est possible de former à l'OGM (organisation et gestion de la maintenance) sur une base technique polyvalente sans risque « d'enfermement », bien au contraire. Quand des jeunes ont acquis l'esprit et les méthodes permettant de résoudre des pannes pour mieux les anticiper, en sachant quel en est le coût, ils peuvent facilement transférer ces compétences au traitement de tout problème technique, que ce soient des défauts (la qualité), des arrêts (la production) ou des accidents (la sécurité et l'environnement).
– Au niveau des chefs de service, la réponse est nuancée. D'abord parce qu'il y a peu d'écoles d'ingénieurs dédiées à la maintenance. Ensuite parce que toute formation d'ingénieur devrait sensibiliser à la fonction maintenance. Mais ce n'est pas encore le cas. Un profil doit être imaginé, basé sur l'apprentissage, situé entre deux pôles extrêmes :
  – le jeune cadre qui fait « ses classes » en maintenance avant de voguer vers de plus « glorieux horizons » vit certainement une expérience positive pour sa carrière, mais qui l'est moins pour le développement cohérent du service ;
  – le vieil ingénieur qui connaît par cœur les équipements et leurs faiblesses n'est pas forcément le mieux à même d'impulser les projets nécessaires en rupture avec l'organisation d'hier.

  Les « mastères » proposés en formation continue par quelques écoles d'ingénieurs semblent être une solution intéressante pour les grandes entreprises.

4. Force est de constater que les formations d'ingénieurs et de techniciens restent déterminées bien plus par le poids de l'histoire et des traditions éducatives de chaque pays que par une évaluation objective des besoins requis par l'exercice d'un métier ou par l'attente du marché du travail. Sans pour cela céder à « l'utilitarisme » du court terme, un équilibre nouveau est à trouver. En maintenance, la polyvalence de la culture attendue ne risque pas d'entraîner les formations vers une spécialisation trop « cloisonnante ».

❑ **Pour conclure**

Rappelons la formidable richesse que représentent le comportement et la compétence des techniciens pour la performance de l'entreprise. Le pari sur l'avenir passe par la formation des hommes. Si le management fut *l'art de faire passer les idées du patron dans les mains des salariés,* il devient *l'art de mobiliser l'intelligence de tous les acteurs.*

1.4 Méthodologie de la maintenance : quelques outils de base

Nous allons aborder certains aspects méthodologiques propres à l'exercice des métiers de la maintenance, et qui méritent une réflexion « isolée », car leurs mises en œuvre se retrouvent éparses parmi les chapitres suivants.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

1.4.1 À propos de l'observation

❑ Définition et commentaires

Éliminons le sens « action de se conformer à ce qui est prescrit » pour ne retenir que le sens « étude attentive d'un phénomène ». En maintenance, l'observation est le point de départ :

– de la détection d'une défaillance (écarts de l'événement constaté avec une situation normale),
– du diagnostic technique (observation des symptômes),
– du diagnostic gestionnaire (observation des indicateurs et de leurs tendances),
– de l'expertise de défaillance (observations complémentaires telles qu'examens micrographiques),
– du dépannage et autres actions correctives.

Et, de façon plus générale, du raisonnement inductif (généralisation opérée à partir d'observations singulières).

❑ Méthode

L'observation se rapporte aux symptômes. Elle se fait évidemment *in situ*, compliquée parfois par les mesures prises en urgence pour préserver un équipement :

– n'observer qu'une seule chose à la fois : isoler successivement les paramètres d'influence pour étudier séparément leurs effets ;
– observer sans juger : être objectif et impartial, éliminer les a priori favorables à une thèse ;
– tout observer : ne rien éliminer a priori, même des faits qui semblent indépendants du phénomène recherché. Une anormalité sur une facture d'énergie peut permettre d'identifier un problème technique !
– tout noter (par croquis, schémas, notes, photos, images vidéo, etc.) : mesurer des cotes, des paramètres physiques, l'état de l'environnement, etc. ; relever des témoignages, des couleurs, des odeurs ; retrouver l'historique des interventions précédentes.

Les exemples fourmillent, au sein des services maintenance, de problèmes résolus par la grâce d'une observation au premier abord fantaisiste. Si l'œil est l'organe de l'observation, n'oublions pas nos quatre autres sens pour nourrir nos observations et pensons que tout l'arsenal des mesures physiques est à notre disposition.

1.4.2 À propos de l'analyse

❑ Définition et commentaires

L'analyse est la « décomposition d'un ensemble en éléments aussi simples que possibles ». Elle permet d'identifier les éléments d'un ensemble et de comprendre la nature des liaisons entre les éléments isolés d'une part, entre un élément et l'ensemble, d'autre part.

La méthode de cet ouvrage est de découvrir, dans une première partie, des aspects de la maintenance par analyses de situations. Nous découvrirons ainsi successivement :

– l'organigramme d'un service (analyse fonctionnelle),

– l'analyse du parc matériel par arborescence,
– les analyses qualitatives de défaillances et quantitatives d'un échantillon de défaillances,
– l'analyse fiabiliste des comportements pathologiques,
– les analyses de temps et de coûts de maintenance.

❑ **Outils de formalisation des analyses**

La structure graphique d'une analyse est toujours une arborescence allant d'un ensemble vers ses éléments constitutifs.

□ **Exemple 1 : décomposition d'un parc matériel**

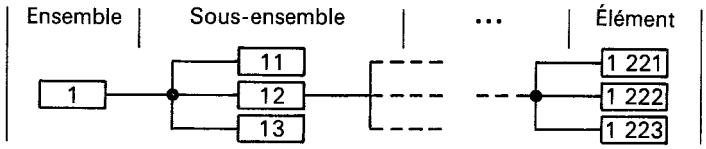


Figure 1.8 – Analyse arborescente d'un parc matériel ou d'un équipement

Le nombre de niveaux dépend de la complexité de l'ensemble, mais aussi des regroupements intermédiaires que l'on veut faire apparaître.

□ **Exemple 2 : arbre binaire de décision, de test, d'aide au diagnostic, etc.**

Il se rapporte à la représentation logique du déroulement d'un processus par une succession de choix binaires : 0 ou 1, bon ou mauvais, oui ou non, etc.

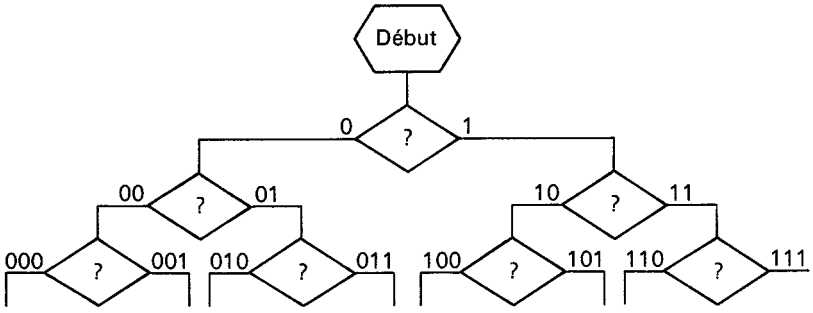


Figure 1.9 – Arbre de décision

La figure 1.10 ci-après fournit un exemple d'application d'arbre de décision destiné à orienter la prise en charge de chaque sous-ensemble ou de chaque organe sélectionné en fonction de critères prédéterminés. L'ensemble des résultats obtenus permet d'élaborer la base d'un plan de maintenance.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

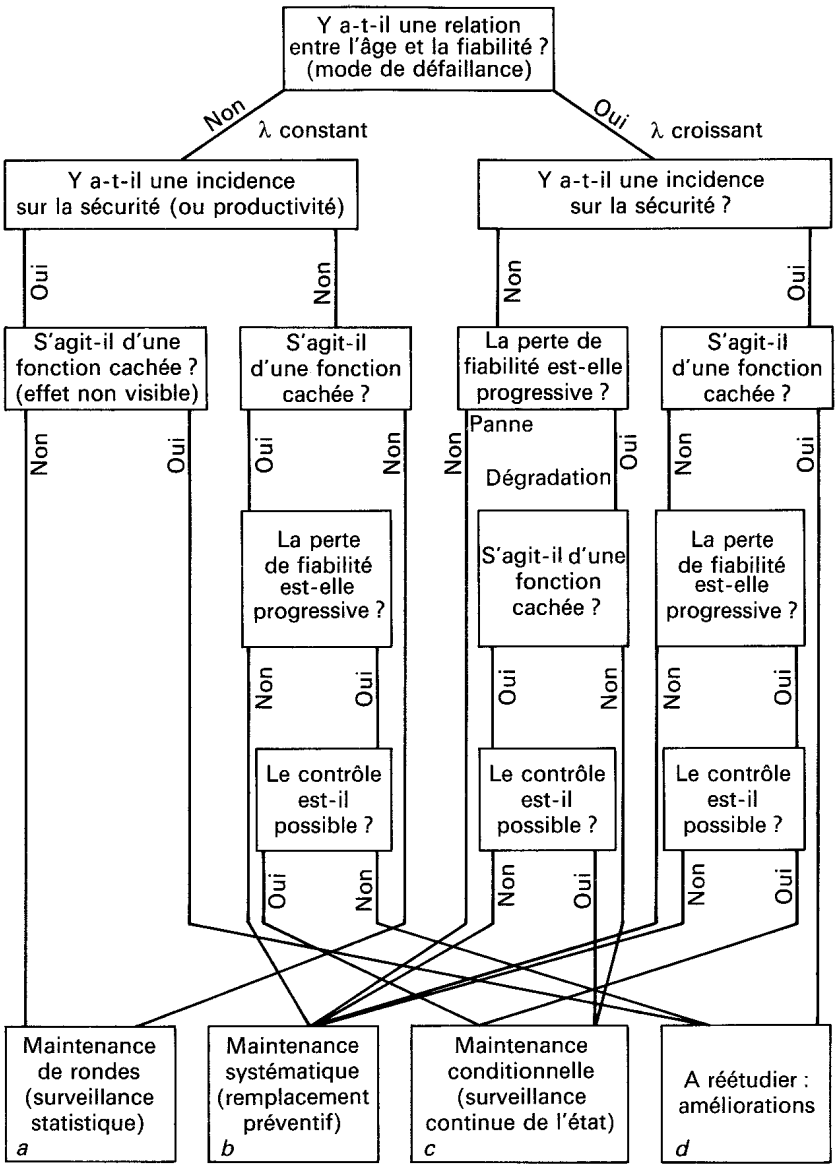


Figure 1.10 – Exemple d'arbre de décision appliqué au choix des méthodes de maintenance

1.4.3 À propos de la communication

❑ Définition et commentaires

La communication est la transmission d'informations, par des supports variés, entre un émetteur et un récepteur. Dans un service, elle est le lien indispensable, entre l'action et la gestion (réflexion + décision). En maintenance, le flux majeur

concerne la liaison entre le site à maintenir (l'action) et le bureau des méthodes (la gestion).

Des intervenants vers les gestionnaires, il s'agira de transmettre les paramètres caractérisant l'intervention telle qu'elle s'est réellement passée. Nous nommerons ce flux « le retour d'expérience local ». À l'inverse, les procédures de la préparation du travail seront transmises aux techniciens. Par nature, la préparation est constituée de « prévisions » (de temps, de coûts, de consommation, etc.) et d'« anticipations » (de risques, d'obstacles, de problèmes, etc.).

Le cumul des retours d'expérience sur des années permet d'établir de bonnes prévisions. Et l'analyse des écarts entre la prévision et la réalité du terrain est source de progrès.

❑ Différentes formes de communication

La forme de communication la plus naturellement humaine est l'oral. Dans une logique de qualité des relations humaines au travail, de compréhension mutuelle et de convivialité, la part « orale » est indispensable pour compenser l'aridité de la messagerie « papier » ou informatique.

En entretien traditionnel, il existait une tendance à négliger la « paperasserie » au sein des services opérationnels, sous prétexte d'efficacité immédiate. C'était la connotation péjorative du « gratte-papier » opposée à l'utilité visible du dépanneur.

En maintenance (et ailleurs…), aucune action importante ne peut être engagée si elle n'est définie, située, programmée, puis enregistrée et analysée en retour. Quant au dépanneur, tâche effectuée, il doit mettre sa compétence à profit pour éviter d'avoir à dépanner de nouveau, encore et toujours. Ce qui peut l'amener à « gratter du papier » ou faire un compte-rendu en GMAO.

Entre l'écrit et l'oral, seul « l'écrit », sur support papier ou informatique, permet :

– d'engager et de préciser une responsabilité,
– d'éviter les altérations, omissions et interprétations propres à l'oral,
– d'être concis : les formes graphiques valent mieux qu'un long discours,
– d'éviter des bavardages inutiles sur le plan fonctionnel, d'avoir à répéter les mêmes choses,
– de stocker l'information, pour une utilisation ultérieure.

Notons que la mise en place d'un système d'assurance qualité et la recherche d'une certification impliquent la rédaction de procédures écrites précises et la traçabilité des actions entreprises. Cet aspect sera développé dans le paragraphe 9.3.

Entre les imprimés et les écrans, la tendance est au « zéro papier ». L'évolution est irréversible et les atouts de l'informatique en matière de communication sont indiscutables : capacité de mémoire, de filtrage, de sécurité, vitesse d'accès à l'information, vitesse de traitement des informations, etc.

Néanmoins, donnons deux arguments « maintenance » allant à contre-courant.

1. Lors d'une intervention sur site, réalisée de façon parfois acrobatique et dans un environnement souvent agressif, il est plus facile d'avoir sous l'œil un schéma ou un plan qu'un PC !

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

2. Quand est mise en place une nouvelle procédure, il est souvent économique et pédagogique de la tester et de la valider à partir d'imprimés avant de l'intégrer à l'informatique.

Pour conclure cette approche, notons que l'efficacité d'un bon système de communication se juge le jour où le chef de service est malade alors que le responsable informatique est en vacances : tous les flux d'information doivent continuer à circuler !

❑ La communication au sein du service maintenance

Nous allons décrire brièvement un système de communication assez traditionnel dans les services maintenance, relatif à une intervention corrective « lourde » prise entre la demande d'intervention et sa clôture. Nous utiliserons les abréviations suivantes :

– DT, demande de travail, ou DI, demande d'intervention, ouvrant un n° de référence, provenant du « client interne »,

– OT, ordre de travail, géré par l'ordonnancement,

– BT, bon de travail, accompagnant la préparation et retourné complété après intervention,

– DA, demande d'approvisionnement,

– BSM, bon de sortie magasin.

La figure 1.11 illustre les différents flux d'information à l'intérieur du service, que les supports soient imprimés ou informatisés.

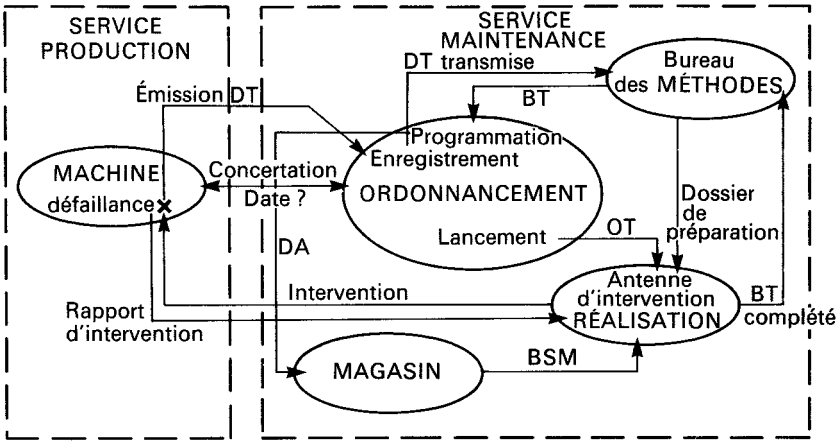


Figure 1.11 – Quelques flux de communication interne en maintenance

La définition de ces flux de communication est très schématique, car l'organisation de la communication opérationnelle en maintenance est par nature complexe : les interventions vont du fortuit au programmé, de l'urgent au différable, du petit dépannage à la révision lourde…

Nous étudierons au chapitre 7 la sous-fonction « ordonnancement », plaque tournante des flux de communication en maintenance, en montrant entre autres comment sont simplifiées les procédures pour des interventions « légères ».

1.4.4 À propos du choix d'action prioritaire

Dégager l'essentiel d'une masse d'informations, et négliger ce qui est négligeable, semble banal. Mais faute d'outil adapté, le gestionnaire se contentera de ses perceptions confuses, en tout cas non objectives. Exploiter efficacement une base de données reste un enjeu important : c'est par exemple une composante importante du retour d'investissement d'une GMAO.

Prenons un exemple important en maintenance : qu'est ce qui pénalise le plus la disponibilité d'une ligne de production ? Est-ce la répétition des petits arrêts qui constituent l'ordinaire des opérateurs ou sont-ce les quelques pannes durables qui créent la panique et impressionnent les mémoires ? Faute de mesures, le gestionnaire ciblera son effort subjectivement sur les grosses pannes, alors que c'est objectivement la répétition des microdéfaillances qui pénalise le plus la disponibilité ! Encore faut-il savoir :

– communiquer pour justifier par des mesures incontestables le bien-fondé du choix des axes d'action prioritaires choisis. À commencer par l'identification des équipements critiques ;
– communiquer pour faire comprendre les axes d'action choisis au personnel chargé de leur mise en œuvre ;
– communiquer pour mettre en évidence les résultats ainsi obtenus et générer une dynamique de progrès continu.

Quand il faut mettre en évidence les résultats obtenus ou à obtenir, on constate que les responsables des entreprises actuelles sont de plus en plus soumis à des contraintes financières à court terme et sont de moins en mois réceptifs aux demandes à caractères technique.

« Il faut remplacer cet organe qui coûte 5 000 € » est une demande à caractère purement technique.

« Cet organe nous a coûté l'an passé 2 000 euros en coût de dépannage et 3 000 euros en perte des productions, son remplacement serait amorti sur un an » est une demande de gestionnaire technique qui sera beaucoup plus prise en considération.

Mais cela impose de connaître les coûts des arrêts des machines et place alors le responsable de maintenance dans une situation de « centre de profit » et non plus de « centre de coût ». Le profit étant le gain de productivité obtenu.

Être considéré comme un « centre de coût » fait apparaître la maintenance comme une charge qui sera toujours trop lourde quelles que soient ses performances.

Le paragraphe 4.4 relatif aux analyses quantitatives de défaillances répond à ce savoir communiquer : il développera trois outils d'aide à la décision de choix d'objectifs prioritaires et d'aide à la communication :

– la courbe ABC de Pareto, d'utilisation très générale ;
– le graphe de Pareto en bâtons, qui permet une bonne visualisation des cibles d'action ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– les graphes de Pareto en NT, outil bien adapté à l'analyse des priorités d'action de maintenance améliorative.

1.4.5 À propos de la recherche permanente d'amélioration

La maintenance, par sa nature propre (volonté de maîtriser au lieu de subir) et en tant que facteur de qualité, doit s'inscrire dans une recherche permanente de progrès.

Il est donc important d'intégrer toutes les activités de maintenance, qu'elles soient techniques ou gestionnaires, dans une logique d'amélioration continue. Pour ce faire, nous rappellerons le principe de la roue de Deming (figure 1.12), l'un des maîtres à penser de la Qualité.

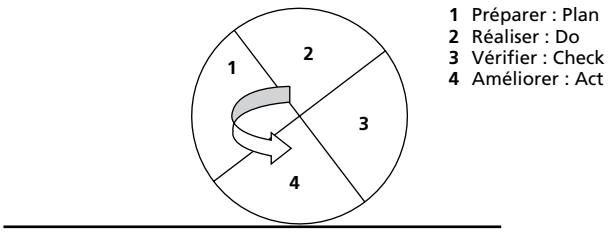


Figure 1.12 – La « roue de Deming » ou « cycle PDCA »

Ce cercle en quatre étapes nous rappelle les préconisations anciennes de H. Fayol (1841-1925) qui, en organisation scientifique du travail, conseillait de « prévoir, organiser, commander, coordonner et contrôler ». La doctrine de Fayol (promoteur de l'organisation des entreprises) consistait à tirer parti des observations et des expériences pour en déduire des règles ou des lois qui deviendront des outils de prévision.

Sur le plan comportemental, on peut rapprocher ce cercle d'une autre itération indispensable à la recherche d'amélioration au niveau du technicien de maintenance.

1. Observer (les symptômes de défaillance).
2. Réfléchir (diagnostiquer : identifier les causes).
3. Agir (par action sur les causes).
4. Mesurer (par analyse des résultats de l'action) de façon à toujours imaginer une amélioration potentielle. Et la proposer si elle apparaît réaliste !

Sur le plan des relations clients/fournisseurs, ce cercle peut s'adapter suivant la terminologie.

1. Écouter (les besoins du client).
2. Comprendre (ses attentes).
3. Réaliser (le service attendu).
4. Améliorer (par analyse des insatisfactions du client).

Quel que soit le contexte, la recherche de progrès ne peut être permanente que si elle s'inscrit dans une itération illustrée par un cercle, dans lequel chaque acteur peut situer son action.

2 • LES DIFFÉRENTES FORMES DE LA MAINTENANCE

2.1 Les maintenances corrective et préventive

2.1.1 Complémentarité des maintenances correctives et préventives

❑ **Définitions utiles**

La maintenance corrective est définie ainsi : « maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

Elle peut être « différée » si « elle n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données ». Elle peut être « d'urgence » si « elle est exécutée sans délai après détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables ».

La maintenance préventive est définie ainsi : « maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité des défaillances ou la dégradation du fonctionnement d'un bien ».

❑ **Situation du problème**

À l'origine de l'action de maintenance se trouve la défaillance d'un bien.

La défaillance et la panne sont définies ainsi : « cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise » alors que « la panne est l'état du bien après défaillance » (projet CEN WI 319-003-5.1).

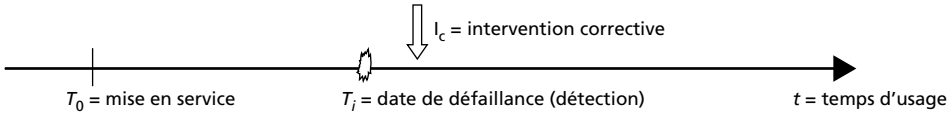


Figure 2.1

La figure 2.1 montre que l'action exercée après une défaillance sera dite corrective et notée I_c (intervention corrective). L'action exercée avant une défaillance sera dite préventive et notée I_p (intervention préventive). Dans ce cas, la défaillance devient virtuelle, mais peut être associée à une probabilité notée $F(t_i)$.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Depuis que l'homme a réussi à fabriquer des outils, puis des machines, il a toujours été amené à réaliser des actions correctives. L'entretien traditionnel consistait majoritairement dans cette réalisation de dépannages et de réparations. Dans une logique de maintenance, nous déterminerons délibérément les actions préventives suivant la politique de maintenance choisie, alors que nous subirons les actions correctives « résiduelles » de cette politique. Nous nommerons « risque α » la probabilité de correctif résiduel, complément inexorable de toute politique préventive.

❑ Aspect économique de la complémentarité préventif/correctif

Le niveau de préventif à appliquer à un équipement relève d'un choix délibéré dont nous étudierons les critères. La figure 2.2 illustre la linéarité des coûts du préventif en fonction du temps passé à le mettre en œuvre. Dans l'hypothèse où le préventif est efficace, le temps passé à corriger les défaillances décroît, ainsi que les coûts associés au correctif résiduel. La somme des deux coûts est une « courbe en baignoire ».

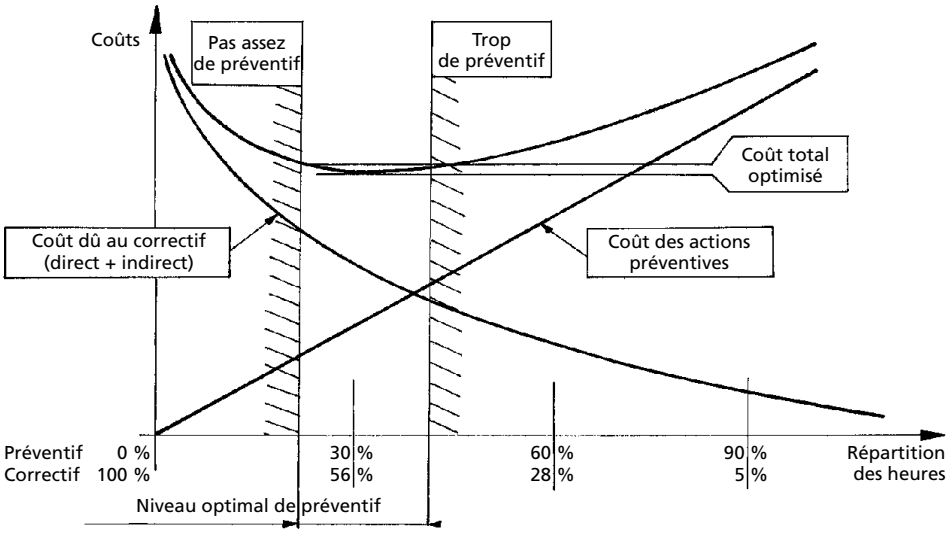


Figure 2.2 – Aspect économique du choix d'un « niveau de préventif »

Dans la courbe ci-dessus le coût du correctif ne tient compte que des coûts maintenance. S'il intègre le coût des pertes de production dues aux arrêts, et selon les entreprises, le coût sera souvent plus élevé et la zone dite « niveau optimal de préventif » sera décalée vers la droite ce qui suppose des taux de préventif plus important.

Ce graphe illustre bien, pour un équipement donné, l'existence d'un optimum économique. Il prouve également que « faire de la maintenance, ce n'est pas faire du préventif à tout prix ».

❑ **Influence du préventif sur la charge de travail**

Construit avec les mêmes abscisses que le graphe précédent, ce graphe met en évidence la décroissance logique de la charge totale de travail lorsque l'on choisit de faire plus de préventif. Cela est vrai jusqu'à un seuil au-delà duquel le correctif résiduel devient quasiment incompressible. Ce qui signifie également que le risque α de défaillance fortuite n'est jamais nul (modèle asymptotique).

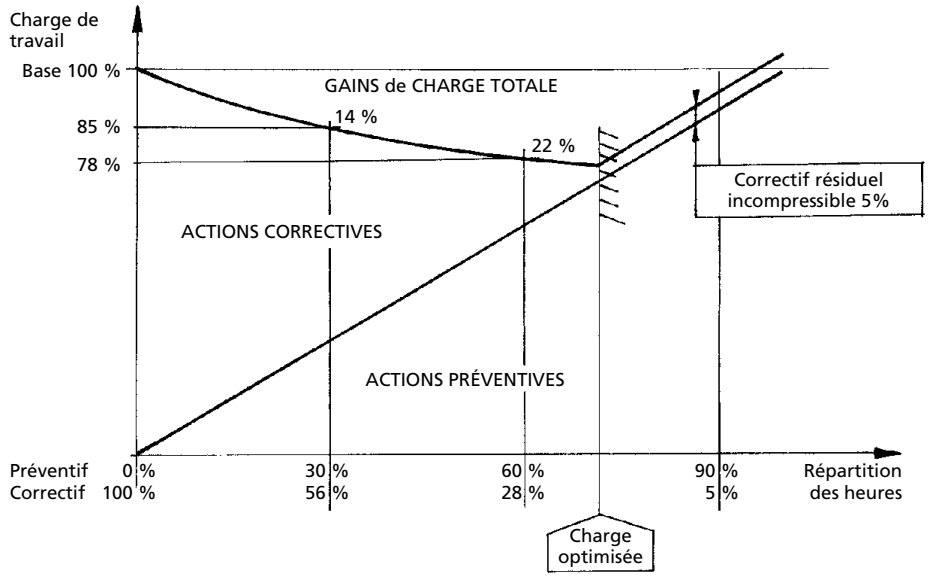


Figure 2.3 – Promouvoir le préventif, c'est réduire la charge de travail

2.1.2 Maintenance corrective

❑ **Caractères de la maintenance corrective**

☐ **À propos de la terminologie**

Avant que l'AFNOR ne définisse (norme X 60-010) la maintenance corrective comme « opération de maintenance effectuée après défaillance », les termes de maintenance subie, fortuite, « pompier », réparatrice, palliative (correspondant au dépannage), curative (réparation) étaient utilisés. Une ambiguïté subsiste aussi bien dans la définition AFNOR que dans le projet CEN : la correction inclut-elle l'idée d'amélioration ?

Pour les actions palliatives, c'est non. Il suffit de retrouver, même provisoirement, la fonction perdue. Ce qui n'exclut pas une exploitation ultérieure des données relatives aux dépannages répétitifs pour chercher des améliorations techniques ou organisationnelles.

Mais pour les actions correctives, associées à l'idée de guérison, donc au diagnostic ? C'est oui. Dès lors que l'on a identifié la cause de la panne, on est en mesure de la prévenir, ou de la rendre moins pénalisante, donc d'améliorer.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ De la panne « tant pis » à la panne « tant mieux »

Les termes de maintenance « améliorative » ou « préservative » ne sont pas normalisés. Cependant, ces formes de maintenance lèvent l'ambiguïté précédente en rendant la maintenance corrective « facteur de progrès » : c'est la panne « tant mieux » dès lors que l'on tire parti d'une défaillance pour améliorer la technologie ou l'organisation. Bien entendu, seules les pannes ayant des conséquences sensibles sont concernées. Attention cependant à ne pas négliger les nombreuses micro-défaillances répétitives qui grèvent lourdement la disponibilité des systèmes automatisés et qui peuvent générer des pannes conséquentes.

☐ Variabilité des actions correctives

Une caractéristique de la maintenance est d'avoir à gérer des actions correctives d'une très grande diversité :

– minimales (quelques secondes pour réarmer une sécurité) ou minimes (changer une lampe) ;
– maximales (des jours de travail pour des équipes) ou majeures (allant jusqu'à la catastrophe avec pertes de vies humaines).

Elles peuvent également être urgentes (effectuées sans délai à partir de la détection d'une panne) ou différées.

Cette grande variabilité implique la mise en place d'une organisation adaptée, chaque intervention technique devant être « encadrée » par une réflexion économique, administrative et sécuritaire. Dans tous les cas, l'organisation doit être « réactive ».

☐ Peut-on programmer et préparer des actions correctives ?

Il en est des interventions correctives comme il en est des défaillances : elles sont par nature fortuites, donc non programmées. L'expression de la fiabilité peut permettre d'évaluer une probabilité d'occurrence, mais pas la date et l'heure. Il ne faut pas confondre la *prévision* et la *prédiction*.

La prévision est possible : rien n'empêche de réserver sur un planning un quota d'heures ou un pourcentage de charge, pour effectuer les dépannages habituels (voir § 7.1, L'ordonnancement). Cette réserve de charge sera estimée par référence au pourcentage d'actions correctives des années passées.

La préparation est également possible : le caractère fortuit des actions correctives n'est pas un argument pour ne pas les préparer et ne pas s'y préparer. Votre voiture a bien un cric, une roue de secours et le mode d'utilisation !

L'AMDEC (voir § 4.5.3) est par exemple un outil de prévision des défaillances permettant d'anticiper des actions correctives (ou préventives, bien sûr). Il en est de même pour tous les outils d'aide au dépannage, développés par les « méthodes-maintenance » en anticipation de défaillances potentielles. Il est également possible et même nécessaire de prévoir les outillages et les pièces de rechange. Et les techniciens sont parfois amenés à « s'entraîner » à réaliser une intervention dont ils ignorent la date.

❑ **Les trois formes de la maintenance corrective**

☐ **Elle existe seule, en tant que système unique de maintenance**

« Ne rien faire tant qu'il n'y a pas de fumée ! »

Caractéristique de l'entretien traditionnel, elle est associée dans ce cas à un préventif minimum de « rondes » : contrôles sensoriels, lubrification, surveillance de l'état. Elle est justifiée lorsque les défaillances probables n'ont pas d'impact important sur la sécurité, la production, la qualité et lorsque les coûts indirects des conséquences des pannes sont faibles. Ce qui devient rare, car peu d'entreprises industrielles sont aujourd'hui dans ce cas. L'inévitable désorganisation qui fait suite à un événement fortuit est en effet incompatible avec les contraintes actuelles pesant sur la production en flux tendu.

☐ **Elle existe de façon sélective, suivant la criticité du matériel**

Le parc matériel ayant été analysé suivant une arborescence et une évaluation de la criticité de chaque équipement, il est légitime de mettre en œuvre une politique préventive liée à cet indice de criticité, et donc de choisir une politique exclusivement corrective pour les seuls équipements de criticité mineure ou nulle.

Cette sélectivité peut se retrouver à l'échelle d'un équipement sensible, dont certains sous-ensembles ne méritent pas de prise en charge préventive.

☐ **Elle existe comme « complément résiduel » de la maintenance préventive**

Nous avons déjà vu que toute politique préventive, quelle que soit sa nature, entraîne un risque non nul de pannes résiduelles. S'il est vrai que l'objectif de la maintenance est de réduire les taux de défaillances, donc le nombre de dépannages, il faut savoir que le préventif est cher et qu'il n'est pas infaillible.

Étant donné un niveau « économique » de préventif déterminé, nous pourrons réduire le coût des interventions correctives résiduelles en réduisant leurs durées :

– par la prise en compte de la maintenabilité à la conception, à l'achat ou par améliorations successives ;
– par des méthodes de préparation efficaces des interventions correctives « attendues », c'est-à-dire prévues, mais évidemment non programmées ;
– par des méthodes d'intervention rationnelles (logistique, outillages spécifiques, échanges standard, etc.).

2.1.3 Maintenance préventive

❑ **Définitions et commentaires**

☐ **Définitions AFNOR X 60-000**

La norme FD X 60-000 décrit la maintenance préventive ainsi :

3.6 : maintenance préventive : Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien, elle est subdivisée en :

– **3.6.1 : maintenance conditionnelle** : maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Remarque

La surveillance du fonctionnement et des paramètres peut être exécutée selon un calendrier, ou à la demande, ou de façon continue.

– **3.6.2 : maintenance prévisionnelle** : Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

– **3.6.3 : maintenance systématique :** Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

3.7 : maintenance corrective : Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique) et/ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle).

☐ Définitions CEN WI 319-003

– Maintenance préventive : « maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation d'un bien ».

– Maintenance programmée : « maintenance préventive exécutée selon un calendrier préétabli ou selon un nombre défini d'unités d'usage ».

– Maintenance systématique : « maintenance préventive exécutée sans contrôle préalable de l'état du bien et à des intervalles définis ».

☐ Commentaires

Seules des nuances distinguent ces définitions AFNOR et CEN : la maintenance préventive a toujours un sens général consistant à réduire la probabilité de défaillance $F(t)$, donc à augmenter la fiabilité $R(t)$ puisque $R(t) + F(t) = 1$.

Sa mise en œuvre peut se faire de façon systématique ou conditionnelle, formes que nous allons analyser de façon détaillée aux chapitres suivants.

Dans beaucoup d'entreprises encore, il y a synonymie entre « préventif » et «systématique», faute de savoir ou de pouvoir appliquer la maintenance conditionnelle.

❑ Caractères de la maintenance préventive

☐ Situation : la phase d'apprentissage du comportement

Nous conseillons durant cette phase d'observation :

– D'enregistrer toutes les interventions avec le temps passé, la durée de l'arrêt, la pièce échangée et/ou une désignation standardisée de la défaillance. L'idéal est une GMAO (on en trouve en monoposte à 2 000 €) avec des listes de pannes spécifiques à chaque équipement. Il pourra ainsi en être déduit des durées de vie des pièces d'usure. Cependant il faudra plusieurs années pour tirer une vision

significative de ces enregistrements appelés comptes rendus d'intervention qui sont dans tous les cas la première action à réaliser.

– De relever la liste des pièces d'usure de chaque équipement.

À l'issue de cette phase d'observation il faudra déterminer avec les techniciens la périodicité de remplacement de ces pièces « sensibles ». Avant la réunion il aura été consulté : les recommandations du constructeur (si elles existent) ou a défaut l'ouvrage de M. Heng, *Mise en œuvre de la maintenance préventive* chez Dunod. Lors de nos interventions nous apportons également des tables de durée de vie issues de nos expériences.

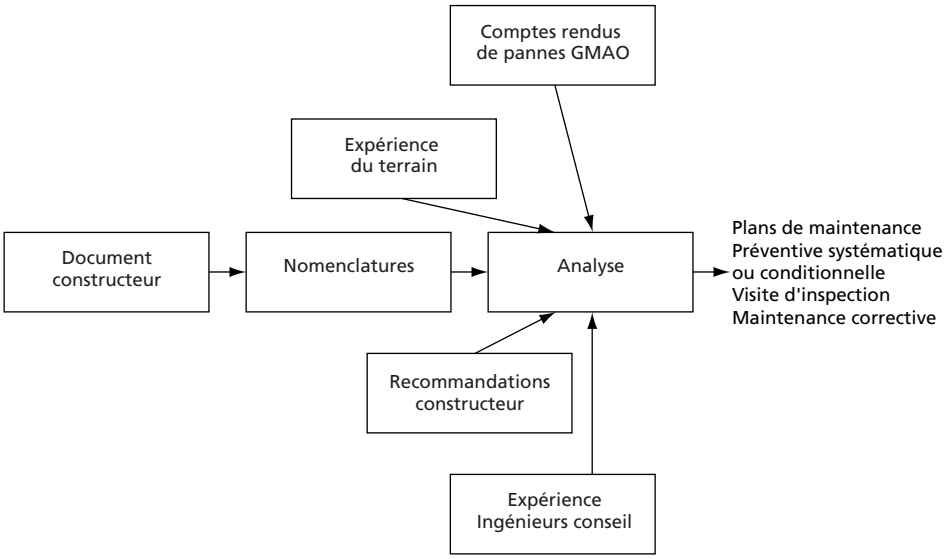


Figure 2.4 – Méthode de conception des plans de maintenance préventive

Cette analyse débouchera sur :

– des plans de maintenance préventive systématique ou conditionnelle ;

– des visites d'inspection ;

– de la maintenance corrective si les autres types de maintenance ne sont pas applicables ;

– des préconisations de politique de stockage.

Cette méthode convient pour des PME ne disposant ni d'un historique des interventions ni des effectifs suffisants. Les entreprises ne présentant pas ces inconvénients préféreront la méthode présentée au chapitre 2.2.

□ Les objectifs visés par le préventif

Par définition, l'objectif de ce plan préventif est de réduire a priori la probabilité de certaines défaillances supposées de l'équipement, donc d'améliorer sa disponibilité et de réduire ses coûts de défaillance. Mais c'est aussi :

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– générer une base de données permettant une prise en charge ultérieure, préventive systématique ou conditionnelle, ou les deux;
– profiter des défaillances qui ne manqueront pas de survenir pour les diagnostiquer, voire les expertiser afin de pouvoir les prévenir. En effet, on ne peut vraiment prévenir les pathologies que lorsqu'on a compris leur mécanisme;
– réduire et régulariser la charge de travail correctif, améliorer l'ordonnancement des travaux, donc les relations avec la production;
– faciliter la gestion des stocks par la prévision des consommations de rechanges;
– assurer la sécurité, car les interventions fortuites débouchent souvent sur des improvisations dangereuses;
– améliorer le climat social, car le « fortuit » (survenant toujours au mauvais endroit et au mauvais moment, comme tout le monde peut le vérifier) génère souvent des tensions relationnelles.

☐ Les deux principales difficultés inhérentes à la maintenance préventive

1. Intervenir sur un système en bon fonctionnement. Par nature, prévenir une panne implique d'intervenir sur un système en bon fonctionnement, inactif ou actif. Dans ce dernier cas surtout, l'intervention est souvent mal perçue par les partenaires de production qui ont de « leur système » une perception à court terme (l'en-cours à livrer). D'où une indispensable concertation sur les modalités de l'intervention préventive.

2. La difficile justification économique de l'action préventive. L'intervention préventive a un coût, noté C_{ip}. La défaillance survenue a également un coût, noté C_d. Lorsque $C_d > C_{ip}$, il est facile de justifier a posteriori une politique préventive.

Il est important de faire entrer le coût de non-production dans ce coût d'intervention. Le contrôleur de gestion a souvent établi un barème qui tient compte de la place de la machine et de la durée de l'arrêt. Ce coût horaire d'arrêt atteint souvent des valeurs de plusieurs milliers d'euros alors que le coût horaire de la maintenance est de quelques dizaines d'euros.

Si vous avez la chance d'avoir une GMAO bien utilisée et bien paramétrée, vous obtiendrez facilement le coût des arrêts des dernières années.

Un autre argument de la maintenance préventive est son impact sur la gestion des stocks. À supposer que la maintenance préventive représente une très forte part des interventions, vous pourrez prévoir les besoins en pièces détachées. Leur stockage ne se justifie plus à l'exception des pièces stratégiques (rôle majeur et long délai d'approvisionnement). Il en résulte une diminution des stocks et du stress, ce qui permet de mieux négocier les prix.

D'où l'intérêt de mettre en mémoire, puis d'exploiter les coûts d'interventions correctives et préventives relatifs à un équipement pour justifier la politique préventive à partir de graphes d'évolution annuels.

☐ Exploitation de la phase préventive

L'intérêt de la phase préventive telle que nous l'avons définie (phase d'apprentissage et d'expérimentation) est d'accepter de « payer » pour savoir (à condition que

le prix soit supportable), puis pour prévenir. Sachant que l'on ne peut prévenir efficacement que ce que l'on a appris à connaître.

C'est ainsi que l'optimisation d'un plan de maintenance préventive se fera progressivement, en fonction de l'expérience acquise. En maintenance systématique, les périodes *T* d'intervention seront précisées au fur et à mesure des retours d'expérience. En maintenance conditionnelle, ce sont les seuils d'admissibilité, ainsi que la validité des paramètres mesurés qui seront progressivement précisés.

2.2 La maintenance systématique

2.2.1 Définitions et commentaires

❑ Définitions

Maintenance programmée : « Maintenance préventive exécutée selon un calendrier préétabli ou selon un nombre défini d'unités d'usage ».

Maintenance systématique : « Maintenance préventive exécutée sans contrôle préalable de l'état du bien et à des intervalles définis ».

Toutes ces définitions se recoupent dans la figure 2.5. Nous noterons *T* la période d'intervention prédéterminée, I_{ps} chaque intervention préventive systématique.

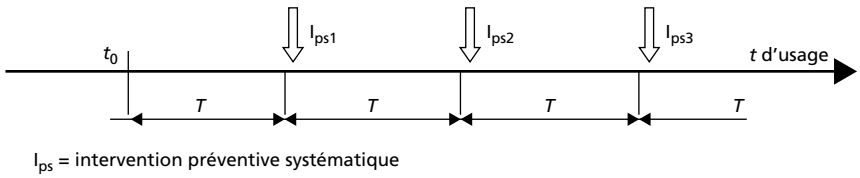


Figure 2.5

❑ Commentaires

□ À propos de la nature des interventions

Les interventions I_{ps} consistent le plus souvent en un changement de composant, mais peuvent consister également en visites préventives, réglages, étalonnages, etc.

Elles peuvent se rapporter :

– à une unité de production (remise à niveau par arrêt annuel par exemple),
– à un système (révision limitée ou générale),
– à un « module » ou sous-ensemble par échange standard (carte électronique, vérin, réducteur, moteur électrique, etc.),
– à un composant « sensible » (filtre, lampe, balai de moteur CC, joint, flexible, courroie, etc.),
– à un fluide (lubrifiant dégradé, etc.).

Pour les interventions « lourdes », elles sont précédées d'une expertise des points à risque (prévision de défaillances potentielles).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ À propos de la programmation des I_{ps}

L'intérêt majeur de la maintenance systématique réside dans sa facilité de gestion. Un programme informatique peut sortir le vendredi le listing des I_{ps} de la semaine suivante. La charge de travail est ainsi connue longtemps à l'avance. Les I_{ps} sont programmées dans la mesure du possible pendant des temps de « non-réquisition » du matériel concerné. Quand ce n'est pas possible, elles doivent générer des arrêts programmés de production minimum, par échange standard de modules par exemple.

Si une défaillance a lieu avant une échéance, nous pourrons soit fonctionner en mode dégradé jusqu'à l'échéance (gestion dite collective), soit refaire partir *T* de la date de l'action corrective (gestion dite individuelle).

☐ À propos du référentiel de temps d'usage

Le référentiel doit être choisi en fonction de l'engagement de l'équipement, mais aussi en fonction de la nature des défaillances attendues sur certains sous-ensembles sensibles. Il peut être absolu ou relatif, l'origine étant idéalement prise à la mise en service de l'équipement.

– *Absolu*, c'est le temps qui court, mesuré depuis la naissance de J.-C. Ce référentiel convient aux équipements dont l'engagement est régulier ou total (24 heures/24 heures). Il convient aussi pour caractériser une « défaillance par vieillissement » qui est une « défaillance dont la probabilité d'occurrence augmente au cours du temps ».

– *Relatif*, c'est une mesure de la durée d'utilisation par comptage d'une unité choisie (heures, nombre de cycles, tonnes produites, etc.). Ce référentiel devient indispensable dès lors que l'engagement de l'équipement est variable, ou lorsque l'on cherche à caractériser un sous-ensemble particulier. Cet axe est nécessaire pour une « défaillance par usure » qui est une « défaillance dont la probabilité d'occurrence augmente avec le temps d'usage ».

Cette réflexion sur le choix du référentiel à partir de la nature de la défaillance à prévenir doit précéder la mise en place de la maintenance systématique. En sachant que le temps « absolu » est plus facile à gérer (programmation calendaire), mais qu'il est souvent moins réaliste techniquement qu'un comptage de l'usage réel. Surtout pour des équipements à taux d'engagement variable.

2.2.2 Détermination de la période *T* d'intervention systématique

❑ Différentes périodes et différentes maintenances systématiques

Sous le même vocable de maintenance systématique, voire de maintenance préventive, sont regroupées des actions de nature très variables, que nous allons étudier en fonction de la valeur de *T* (période d'intervention).

Tableau 2.1

Valeurs de *T*	Natures des actions systématiques	Critères du choix de *T*
Période courte 1/2 jour à 1 semaine	– Surveillance « active » – Visites préventives, rondes – Consignes permanentes/poste	– Préconisations fournisseur – Expérience – Habitudes empiriques
Période moyenne $T = k \cdot MTBF$ comprise entre 1 semaine et 1 an	– Échange standard de module ou de composant – Actions ponctuelles sur un composant « fragile »	– Réglementaire – Préconisations – *T* optimisée par calculs, essais ou expériences
Période longue 1 an à 10 ans	– Révisions limitées, générales, décennales – Arrêts périodiques, annuels	– Réglementaire – Empiriques (*T* liée aux contraintes sociales : congés annuels par exemple)

Ces travaux ont tous en commun leurs caractères systématique et préventif. Là s'arrête la comparaison :

– les travaux à période courte concernent surtout les opérateurs sur site. La « surveillance active » comprend les nombreuses mini-interventions dont peut prendre l'initiative un opérateur vigilant : resserrer des écrous, compléter un niveau de lubrifiant, détecter une fuite, retendre une courroie, etc. Ce « soin » de nature préventive évite bien des défaillances ultérieures ;

– les travaux à période moyenne concernent les techniciens de la maintenance. C'est à ce niveau que la détermination des périodes *T* est importante ;

– les travaux à période longue sont souvent pour partie sous-traités à plusieurs prestataires extérieurs, bien que gérés par les « méthodes-maintenance » en interne.

❑ Choix de *T* en fonction du risque de « correctif résiduel »

☐ Situation du problème

Dans le tableau 2.1, nous nous intéresserons uniquement à l'optimisation de *T* par raisonnement ou par calculs, car c'est le problème intéressant l'agent des méthodes. La maintenance systématique était appelée auparavant « maintenance sur potentiel d'heures » (en aéronautique). Cette détermination d'un certain « potentiel d'heures » correspond bien à notre propos.

Soit une fonction de distribution $f(t)$, supposée normale (m_1,σ_1), de défaillances relatives à un « module », ce qui suppose la connaissance de son comportement à partir d'un historique exploitable (échantillon de taille *N* significative).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

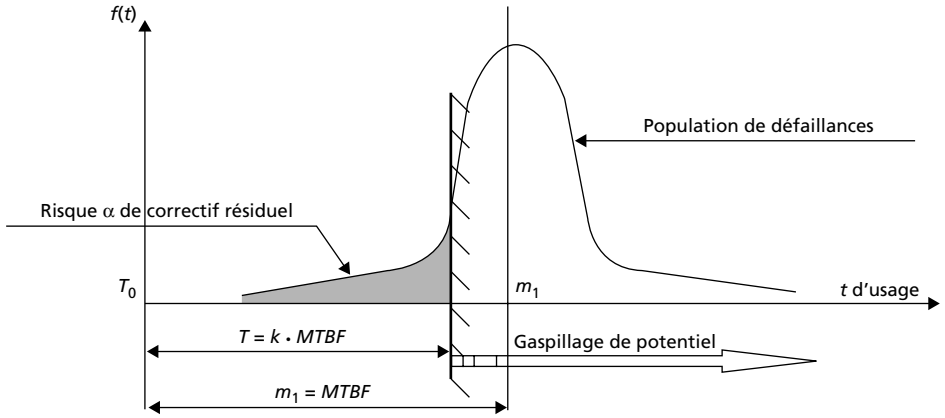


Figure 2.6 – La distribution des défaillances et la maintenance systématique

La moyenne des temps de bon fonctionnement de ce module, notée *MTBF*, est m_1. Si nous changions ce module à la valeur $T = m_1$, 50 % des défaillances auraient lieu avant *T*, ce qui est naturellement inacceptable.

Aucun module ne dépassant *T*, nous appellerons « correctif résiduel » la probabilité $F(T)$ de panne avant *T*. La période *T* peut donc s'écrire $T = k \cdot MTBF$, *k* étant un coefficient réducteur de la *MTBF*.

Connaissant la loi $N(m_1,\sigma_1)$ il est possible de déterminer la période *T* à partir d'un risque α d'avoir une défaillance avant *T*. À l'inverse, il est possible d'associer un risque α à partir d'une période *T* prédéterminée.

Si la loi de distribution n'est pas normale, un ajustement à une loi de probabilité telle que Weibull est possible, pour obtenir les mêmes possibilités, en liant *T* et α (voir au paragraphe 5.3 des exemples d'application).

□ **Incidences des valeurs *m* et σ**

Un composant ayant une bonne *MTBF* permet naturellement un espacement des I_{ps} s'y rapportant.

Considérons maintenant sur la figure 2.7 les deux composants C_1 et C_2 ayant chacun une distribution normale telle que leurs *MTBF* ($m_1 = m_2$) ont même valeur, mais dont les écarts-types diffèrent ($\sigma_1 < \sigma_2$).

À une même valeur de *T* vont correspondre deux valeurs de α telles que $\alpha_1 < \alpha_2$. Le risque de correctif résiduel sera supérieur avec C_2, dont les performances de durées de vie sont plus « dispersées », ce qui peut être une contre-indication pour le préventif systématique. Ou, si l'on veut avoir des risques identiques ($\alpha_1 = \alpha_2$), il faudra choisir $T_2 > T_1$, ce qui entraînera un gaspillage de potentiel plus important.

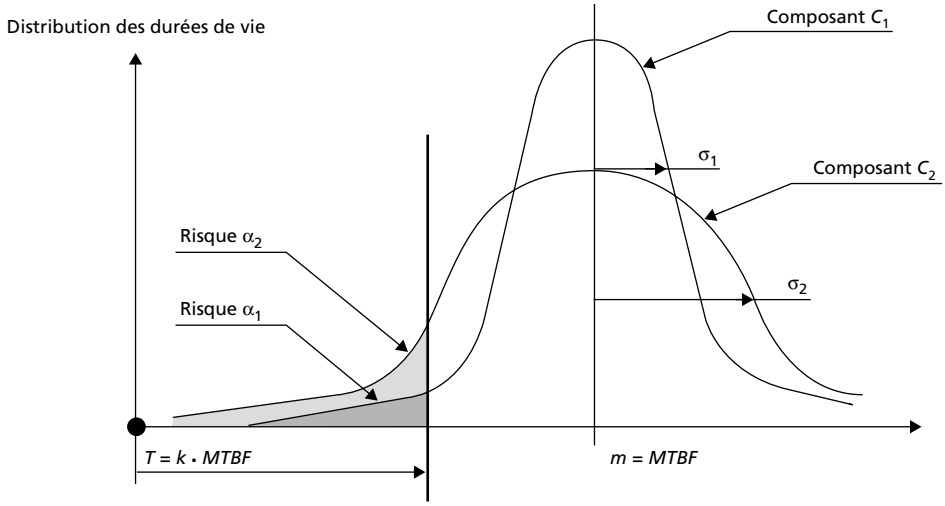


Figure 2.7 – De l'importance de l'écart-type σ sur le choix de *T*

□ Incidences du choix de la valeur *T*

Si T décroît, nous intervenons plus souvent, donc nous avons :

– plus de consommation de modules, plus de coûts directs (pièces et main-d'œuvre),

– plus d'occasions de gêner de la production,

– plus de gaspillage de potentiel d'utilisation du module.

Mais aussi moins de risque de défaillance avant *T*, donc une plus faible probabilité de subir les coûts indirects (conséquences économiques d'une défaillance fortuite).

Si *T* croît, les implications précédentes sont naturellement inversées. D'où une méthode « de bon sens » pour déterminer *T* en fonction du risque α de correctif résiduel.

Remarquons que le raisonnement relatif à l'incidence économique du choix de *T* est le même que celui de la détermination d'une période de garantie.

❑ L'optimisation économique ϑ de la période *T*

C'est une réflexion sur la criticité économique d'une défaillance qui va nous faire choisir de la prévenir, à partir d'un historique de phase corrective par exemple. Cette même criticité économique estimée permet d'optimiser le choix de *T*. Nous noterons ϑ la valeur de *T* optimisée suivant des critères économiques.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ **Première méthode : simulation économique**

Prérequis

– Connaissance de la loi de distribution $f(t)$ des défaillances à prévenir, donc du taux de défaillance λ et du risque α associé à la période d'intervention T.

– Estimations du coût de l'intervention corrective C_{ic} et du coût de l'intervention préventive C_{is} (incluant les coûts de non-production).

Méthode

– On choisit une durée d'application de la maintenance systématique (3 ans, par exemple).

– On fait varier T pour des valeurs réduites de la $MTBF$ ($0{,}5 < k < 0{,}9$) et l'on calcule pour chaque valeur de T le nombre d'I_{ps} sur la durée choisie.

– Pour chaque valeur de T, on estime le coût direct des n interventions préventives nC_{is}.

– Pour chaque valeur de T, on estime la probabilité $F(T)$ d'avoir n' interventions correctives de coûts $n'C_{ic}$.

– Pour chaque valeur de T, on fait le total $nC_{is} + n'C_{ic}$.

On choisit alors la valeur de $\vartheta = T$ optimisée induisant le coût minimal sur la durée considérée. À partir du taux de défaillance λ, il est possible d'évaluer le gain de cette politique préventive par rapport à une politique corrective (éventuellement pratiquée et évaluée dans une phase précédente).

☐ **Deuxième méthode : loi de Weibull et abaques d'optimisation**

Cette méthode d'optimisation de la période d'intervention systématique $\vartheta = T_{opt}$ à partir de données de fiabilité et de données économiques sera développée dans le paragraphe 5.3.5, suite à l'étude de la loi de Weibull.

2.2.3 Intérêt de la conception modulaire pour la maintenance systématique

❑ **Notion de module**

La décomposition arborescente d'un équipement fait atteindre le niveau « sous-ensemble » ou « module » qui est stratégique pour la maintenance. La figure 2.8 montre que c'est à partir du niveau d'un module que se pose la question : nous consommons ou nous réparons ?

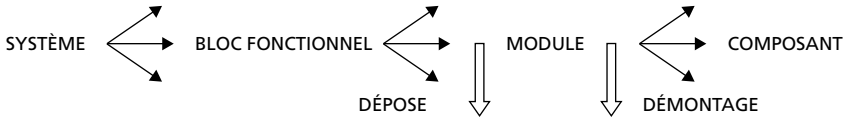


Figure 2.8 – L'intervention préventive systématique I_{ps} peut se rapporter à un *module* ou à un *composant*

Un module est un sous-ensemble conçu pour être rapidement « déposé » aux fins d'interchangeabilité. Un moteur électrique, une pompe centrifuge, un vérin, une carte électronique, un automate programmable sont des modules. Leur dépose permet des interventions correctives ou préventives rapides et aisées minimisant les arrêts de production. C'est un aspect important de la « maintenabilité » à imposer à la conception modulaire d'un équipement.

Après dépose, deux options sont possibles, suivant les compétences présentes et suivant les coûts du module et de son éventuelle remise à niveau :

– la consommation du module par échange standard et élimination de l'ancien;

– la remise à niveau du module, après test, démontage puis expertise, suivie d'une remise en stock « rechanges ».

❑ Durée de vie d'un module

Tout module est généralement constitué d'un grand nombre de composants dont seuls quelques-uns sont « fragiles » : roulements, joints, filtres, courroies, durites, balais, lampes, contacts… Ils pénalisent la durée de vie du module suivant la formule : *MTBF* (module) = *MTBF* (composant le plus fragile). Nous voyons donc l'intérêt pour les utilisateurs d'avoir des composants de durées de vie homogènes au sein d'un module, ce qui limite la fréquence d'intervention.

❑ Implications pour la conception modulaire et la maintenance systématique

La prise en charge du module se fera en maintenance systématique à une périodicité $T = k \cdot MTBF$ (module). Ce qui suppose une bonne homogénéité des durées de vie des composants. Il appartient au concepteur :

– de fiabiliser les composants les plus fragiles (par exploitation de retours d'expérience);

– de réaliser éventuellement des économies en raccourcissant les durées de vie « luxueuses » de certains constituants.

Une bonne conception modulaire, vue par la maintenance, doit permettre :

– une bonne détectabilité d'un défaut interne au module (alarme et localisation intégrées);

– une interchangeabilité rapide (temps de dépose) et facile (technicité);

– une homogénéité des composants (éviter d'avoir à changer périodiquement un module pour un seul composant trop peu fiable).

❑ Dimension humaine : un avantage de la modularité

La modularité peut être une bonne réponse à un problème de plus en plus fréquent : l'existence d'un déséquilibre entre la technicité requise et la technicité présente sur le site. Aussi bien dans le cas d'une action corrective que préventive, la dépose d'un module peut être effectuée rapidement par un opérateur non compétent pour intervenir dans le module. Le diagnostic ou l'expertise seront éventuellement faites par des techniciens de maintenance, en « temps différé ».

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

La maintenance des modules « cartes électroniques » est un bon exemple de cette conception modulaire : un agent non électronicien peut réaliser en autonomie un changement de cartes si le système défaillant est équipé d'une autolocalisation du défaut.

2.2.4 Gestion de la maintenance systématique par la méthode ABAC-ABAD

❑ **Problème à résoudre**

Rappelons que l'avantage majeur de la maintenance systématique est d'être facile à gérer. Or nous venons de voir comment l'on peut optimiser une période d'intervention systématique « individualisée ». Si l'on applique à un système les *n* périodes *T* optimisées trouvées pour chaque composant et pour chaque module, l'on arrive à une planification aberrante, car contraire à l'objectif initial de simplicité !

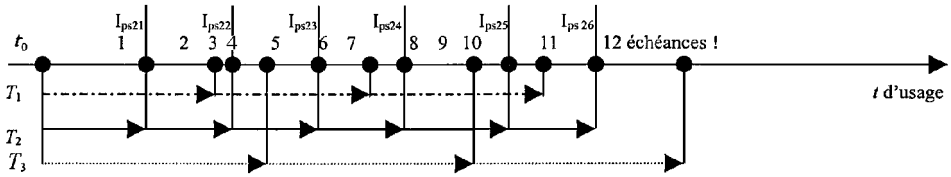


Figure 2.9 – L'individualisation des périodes conduit à un non-sens

Cette figure caricaturale, construite à partir de seulement trois périodes T_1, T_2 et T_3, montre des interventions préventives incessantes, perturbant la production.

❑ **Solution : la méthode ABAC-ABAD**

L'idée de base est de regrouper ces différentes I_{ps}, à partir d'un « pas » sous-multiple d'une durée de cycle prédéterminée : 1 an ou 52 semaines en unités calendaires, ou 8 000 heures en durées d'usage par exemple, cela afin de limiter le nombre des interventions. Ces regroupements de périodes à des échéances prédéterminées implique de modifier légèrement les périodes *T* que l'on a individuellement optimisées.

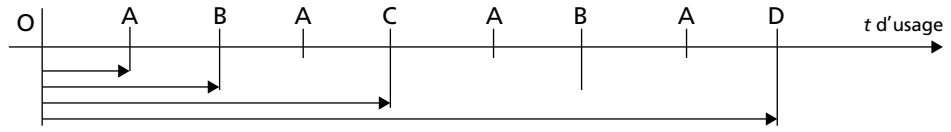


Figure 2.10 – Principe de la méthode ABAC-ABAD

Nous aurons ainsi à programmer 4 (ou 8, ou 16) types d'intervention.

OA correspond au « pas », OD correspond souvent à un cycle de *révision* générale ou limitée.

I_{ps} de type A : listing du regroupement des périodes *T* voisines de OA.

I_{ps} de type B : A + regroupement des périodes voisines de OB.

I_{ps} de type C : A + B + regroupement des périodes voisines de OC.

I_{ps} de type D : A + B + C + regroupement des périodes voisines de OD.

Il est toujours possible d'individualiser (par exception à une règle) la prise en charge préventive d'un module ou d'un composant « sensible » dont le comportement est bien connu. L'objectif en la matière étant de réduire le nombre des interventions Ips, surtout s'il s'agit d'arrêts programmés.

La préparation spécifique des tâches de maintenance systématique est développée dans le paragraphe 6.5.

2.2.5 Synthèse : avantages et inconvénients

La maintenance préventive systématique a un grand avantage : elle est facile à gérer par le fait que les activités sont programmées. La charge de travail est ainsi connue à l'avance, ainsi que la nature des travaux préventifs et les consommations s'y rapportant (gestion des stocks). Les arrêts de production, s'ils s'avèrent indispensables, sont également « négociables » à l'avance avec la production.

Contrairement à la maintenance conditionnelle, elle s'applique à des défaillances « catalectiques » (soudaines et complètes) aussi bien qu'aux « dégradations », à condition d'exploiter un historique de ces défaillances. En diminuant le nombre des événements « fortuits », elle est aussi un facteur de régularisation des activités dans l'entreprise (moins d'improvisations = plus de sécurité). Toutefois, elle présente également des inconvénients :

– de façon inhérente à la méthode, elle génère un inévitable « gaspillage de potentiel » d'utilisation d'un module ou d'un composant. Pour une courroie de transmission ou un joint, ce n'est économiquement pas grave. Lorsqu'il s'agit d'un sous-ensemble coûteux, c'est plus discutable. Nous verrons au paragraphe suivant « la maintenance conditionnelle » un meilleur moyen de résoudre ce problème ;
– le risque de « correctif résiduel », n'est pas toujours facile à évaluer. Faute de données opérationnelles suffisantes, les agents des méthodes sont souvent réduits à fixer des périodes d'intervention par empirisme, sans réellement maîtriser le risque de panne fortuite. Qui, dans tous les cas, est « non nul » !
– comme toute action préventive, l'intervention sur un bien « qui marche » peut être mal perçue ;
– enfin, ce que coûte un plan de préventif systématique est visible. Ce qu'il rapporte l'est moins…

2.3 Les maintenances conditionnelle et prévisionnelle

2.3.1 Définitions, illustration et commentaires

❑ **Définitions**

☐ **Norme AFNOR X 60-000**

« Les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service. »

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Maintenance préventive conditionnelle : « Les remplacements ou les remises en état des pièces, les remplacements ou les appoints des fluides ont lieu après une analyse de leur état de dégradation. Une décision volontaire est alors prise d'effectuer les remplacements ou les remises en état nécessaires. »

Maintenance prévisionnelle : « maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien permettant de retarder et de planifier les interventions. Elle est parfois improprement appelée maintenance prédictive ».

☐ Commentaires

– Avant la parution des normes AFNOR, la maintenance conditionnelle s'appelait « *on condition* » ou « selon l'état ».

– Les normes ont en commun la notion de « surveillance » de l'état à partir d'un paramètre significatif d'une dégradation, souvent par des mesures.

– Le terme de maintenance « prédictive » est justement déconseillé. La prévision est une responsabilité naturelle du décisionnaire sérieux; la prédiction est pour le charlatan…

– La maintenance prévisionnelle ne diffère de la maintenance conditionnelle que par l'idée d'extrapolation de la tendance analysée. Elle permet de passer de « l'état constaté » à « l'état prévisible ».

❑ Illustration du principe de la maintenance conditionnelle

La figure 2.11 illustre le principe de la maintenance conditionnelle. Elle se rapporte au suivi par mesures périodiques d'une dégradation jusqu'au seuil d'alarme qui déclenche une intervention préventive conditionnelle (notée I_{pc}).

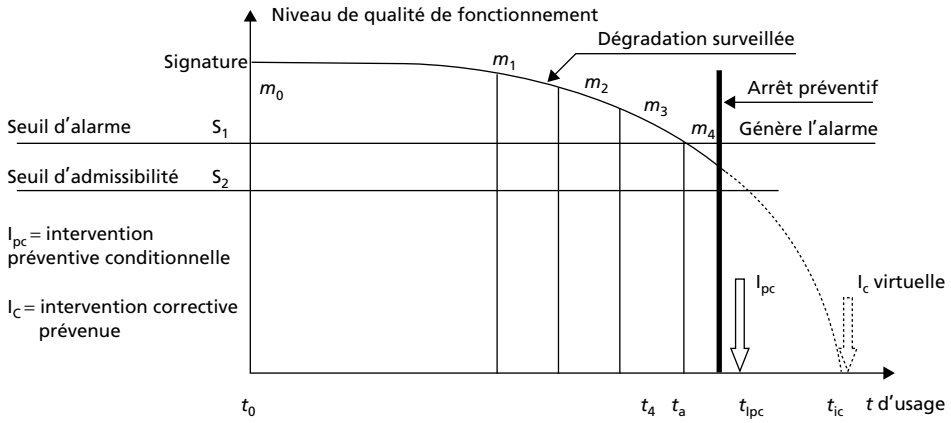


Figure 2.11 – Principe de la maintenance conditionnelle

– La « signature » est une prise de référence de l'état de « bon fonctionnement » à l'origine.

– Les mesures (cas le plus fréquent) peuvent être de simples observations visuelles (état constaté), des images (spectres, radios, etc.). Elles peuvent être remplacées par des alarmes préréglées (led, fusible, etc.), ou des inspections préventives *in situ*. Les mesures m_i peuvent être continues ou périodiques, espacées de Δt de telle manière que la dégradation à prévenir ne puisse échapper à la surveillance :

$$\Delta t < t \text{ admissibilité} - t \text{ alarme}$$

Les mesures peuvent ne pas commencer à t_0 (sauf signature) si l'on connaît la loi de dégradation. Les mesures peuvent être collectées par rondes ou « monitorées » au central de surveillance.

– L'arrêt sera généré automatiquement par l'alarme (cas d'un fusible), ou différé par décision volontaire jusqu'à l'I_{pc} programmée et organisée.

– L'intervention I_{pc} sera programmée à partir de l'alarme, suivant un temps de « réaction » du service maintenance à prédéterminer. Son coût direct C_{Ipc} sera par nature (choix de la dégradation à prévenir) très inférieur au coût (direct + indirect) de la défaillance évitée :

$$C_{Ipc} << C_{ic}$$

2.3.2 Méthodologie de la mise en œuvre

La méthodologie est proposée en neuf étapes successives qui permettent de poser le problème de la maintenance conditionnelle à partir d'une défaillance à prévenir avant de choisir les matériels nécessaires, d'organiser la surveillance et de préparer l'I_{pc}.

❑ 1. Sélection des défaillances à prévenir

Soit un équipement E connu. La première tâche est de sélectionner des défaillances dangereuses, coûteuses ou répétitives, par exploitation des historiques. Ce seront des défaillances par dégradation, donc détectables. Si l'équipement est mal (ou pas) connu, une AMDEC (voir § 4.5.3) permet d'identifier des pannes probables, graves et détectables.

❑ 2. Sélection d'un (ou *n*) paramètre physique

Ce paramètre sélectionné devra être :

– *observable ou mesurable.* Toutes les mesures physiques habituelles (dimensions, pressions, débits, intensités, températures, etc.) sont potentiellement des paramètres utilisables ;

– *significatif de l'évolution du mode de défaillance à anticiper.* Remarquons que ces observations ou mesures sont faites aux frontières ou dans l'environnement du sous-ensemble dégradé ;

– *interprétable* : l'important est de savoir établir une corrélation entre la mesure et l'état interne (la pathologie), à l'identique du thermomètre médical. L'idéal étant d'être capable de se servir de l'observation non seulement pour connaître l'imminence d'une panne, mais pour diagnostiquer sa nature. C'est bien d'avoir un spectre vibratoire relatif à un palier, c'est mieux d'en déduire le moment où il

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

faut arrêter le moteur, c'est idéal si on sait en déduire un « désalignement » ou un « desserrage » qui évitera de changer « pour rien » les roulements.

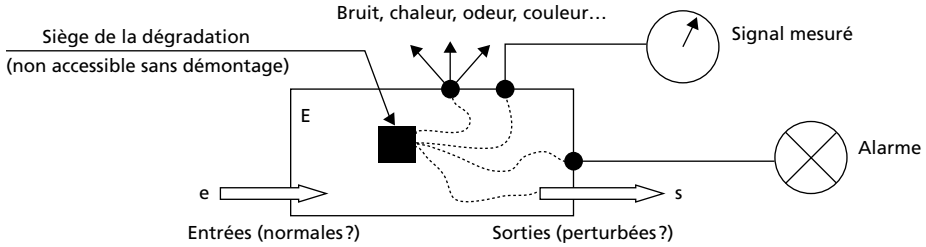


Figure 2.12 – Symptômes observables ou mesurables associés à une dégradation

Le paramètre sera parfois « direct » (usure surveillée par mesure de cote) ou plus souvent « indirect » (surveillance de l'usure par les ppm de particules solides trouvées dans une analyse de lubrifiant).

❑ 3. Choix des capteurs

À chaque nature physique du paramètre sélectionné correspond une panoplie de capteurs qui ont en commun d'évoluer vers la miniaturisation et la fiabilité (exemple : utilisation de cristal piézo-électrique). Les API (automates programmables industriels) permettent d'extraire des informations de toutes natures relatives à « l'état » de l'automatisme.

Notons la conception de capteurs dits « intelligents » capables de ne délivrer que des informations « triées ». Et n'oublions jamais que l'homme est pourvu de cinq sens et d'un cerveau : son remplacement systématique par des technologies de supervision ne se fait pas sans risque.

❑ 4. Choix du mode de collecte des informations

La collecte peut se faire par ronde (*off line*), ou par télésurveillance (*on line*), ou par panachage des deux (système « compass » de Bruël et Kjaer). Les arguments de choix portent essentiellement sur des critères économiques : les salaires des agents de ronde contre un investissement initial lourd. Bien sûr, le monitorage est à la mode. Mais n'oublions pas les critères humains. Un bruit anormal, le « reniflage » d'une fuite de gaz ou l'observation visuelle d'une fuite liquide par un rondier compétent peut prévenir une catastrophe. Vouloir le remplacer par de l'instrumentation est coûteux et présomptueux.

Un autre choix à faire est celui de la fréquence des observations : continues ou périodiques. Le problème est de faire en sorte qu'aucune accélération du processus de dégradation ne puisse passer entre deux observations successives. La connaissance de la nature des phénomènes pathologiques et de leur vitesse d'évolution permet de choisir la période entre deux observations.

La prise en compte de l'utilisation d'« outils » de la maintenance conditionnelle dès la conception facilite bien les choses ultérieurement. Par exemple, un simple tarau-

dage bien situé permettra de fixer un accéléromètre donnant des informations vibratoires de qualité, ciblées et donc facilement exploitables. Plutôt que de le coller au seul endroit accessible, qui donnera plein d'interférences et une information impossible à interpréter.

❑ 5. Détermination des seuils

□ Seuil d'admissibilité S_2

Il sera choisi en fonction de contraintes réglementaires lorsqu'elles existent. Exemple trivial : le changement conditionnel du pneu usé de votre voiture ! Sinon, il est rare que les constructeurs fournissent des préconisations. La démarche expérimentale est donc souvent utilisée, quitte parfois à « payer » une fois pour savoir.

La prise de référence initiale (signature S_0) est surtout indispensable pour les « images » et les « spectres ». Mais la connaissance de la « normalité » est nécessaire pour toutes les formes d'interprétations différentielles.

□ Seuil d'alarme S_1

Il sera choisi à partir du seuil d'admissibilité, en prenant en compte :

– la vitesse de dégradation,

– le temps de réaction avant l'intervention.

Pour bien comprendre le problème, prenons l'exemple d'un automobiliste, sur autoroute, découvrant l'alarme de jauge à essence : à quelle distance est la prochaine station ? quelle est la réserve d'essence en litres ? quelle est la consommation en l/km (la loi de dégradation) ? Il doit déduire de ces éléments la conduite à tenir pour décider d'un arrêt préventif. Profitons-en pour comparer l'I_{pc} (faire le plein) et l'I_c correspondante (après la panne d'essence) : perdre du temps, faire du stop, payer une amende, etc. puis payer le plein !

❑ 6. Choix du traitement de l'information

□ De la surveillance à l'analyse

Le cas le plus simple est celui de la surveillance par un technicien : son observation directe déclenche l'Ipc. La génération automatique d'alarme correspondant à un seuil (led allumé par exemple) a le même résultat : le surveillant déclenche l'I_{pc}.

Autre cas : les informations d'état collectées par rondes ou centralisées sont chronologiquement cumulées (base de données par logiciel informatique). Puis elles sont comparées (cas des images thermiques infra-rouges, par exemple) ou sont mises sous forme de graphes d'évolution (cas des mesures). L'interprétation permet dans ce cas de situer la prochaine atteinte d'un seuil et de s'organiser en conséquence. Pour la maintenance prévisionnelle, l'extrapolation des évolutions permet la programmation d'une prochaine intervention I_{pc}.

□ De l'analyse au diagnostic

Savoir qu'un roulement va prochainement « lâcher » est mieux que de subir la défaillance de façon fortuite. Mais il est encore mieux de savoir pourquoi il n'a pas tenu. Les analyses de vibrations par bandes de fréquences peuvent répondre à cet

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

objectif de diagnostic d'un défaut. Au prix d'un matériel coûteux et d'une compétence demandant une formation spécifique appuyée par une phase d'expérimentation délicate : quel est le meilleur paramétrage pour une machine donnée ?

❑ 7. Définition des procédures après alarmes

Le souci premier sera de penser « sécurité ». Des hommes et des matériels. Pour des cas à risque, une alarme sonore est possible. À partir de l'alarme, la décision première sera : arrêt immédiat ou différé. Remarquons que l'alarme peut générer automatiquement l'arrêt : c'est le cas d'une protection thermique, voire d'un simple fusible électrique dont la calibration revient à fixer un seuil. Il faudra aussi envisager les possibilités de reconfigurer le système en imminence de panne.

Dans le cas de la télésurveillance, la rédaction des procédures à appliquer en fonction de la nature des alarmes en particulier, est un travail délicat pour les méthodes-maintenance. De plus, la prise de décision « à distance » ne doit pas dispenser de collecter un complément d'informations *in situ*.

❑ 8. Organisation de l'intervention conditionnelle I_{pc}

Après vérification sur site de la véracité de l'alarme et de l'existence d'un risque de défaillance imminente, il faut préparer, éventuellement programmer, puis réaliser l'intervention préventive conditionnelle (voir § 6.5.3).

❑ 9. Bilan d'efficacité et retour d'expérience

L'un des avantages de la maintenance conditionnelle est de pouvoir vérifier, voire mesurer l'efficacité de l'intervention. En effet, il est possible de comparer les valeurs des paramètres « après » aux valeurs « avant » qui marquaient la normalité (signatures, valeurs de référence). Un « faux diagnostic » peut ainsi être détecté.

L'intervention I_{pc} participe à l'apprentissage du comportement du système. Elle permet souvent d'optimiser les valeurs de seuil et se traite en saisie comme une intervention corrective… que l'on a pas eu à payer au prix fort !

2.3.3 Acheter ou imaginer la maintenance conditionnelle ?

❑ Remarque préliminaire

Tous les ouvrages, les articles, les conférences traitant de la maintenance conditionnelle partent de la description d'un ou de plusieurs outils spécifiques, et débouchent sur leur potentialité d'application. C'est encore plus net si l'on visite un salon, dans lequel des fournisseurs présentent leurs outils de prédiction.

Nous allons montrer que cette démarche de type « consommation d'outils prêts à maintenir » est restrictive et n'est pas la seule possible.

❑ La démarche habituelle

Partir des outils du commerce pour trouver des applications sur site

Dans ce cas, nous partons de la connaissance des outils préexistants dans le commerce et nous cherchons à leur trouver un éventuel champ d'application sur un site donné. Après cette étude de « faisabilité », il reste à justifier l'investissement

par l'estimation de son temps de retour. La panoplie des outils les plus habituellement proposés (voir § 2.3.5) consiste en :

– mesures et analyses de vibrations ou d'ondes de choc,
– mesures acoustiques,
– analyses d'huile, de la tâche du buvard à la spectrographie,
– imagerie infrarouge.

À ces outils il faut ajouter la gamme des contrôles non destructifs (CND), chacun d'entre eux étant potentiellement un outil de la maintenance conditionnelle.

❑ Une démarche novatrice

Partir des problèmes du site pour trouver des solutions préventives

La démarche consiste à appliquer la méthodologie en neuf points du paragraphe 2.3.2 à partir de l'identification des problèmes existant sur le site. C'est-à-dire à « poser le problème avant de vouloir le résoudre ». Illustrons notre propos : lorsque les dégradations à prévenir sont identifiées et sélectionnées, quelles sont les possibilités offertes ?

– Exploiter le matériel existant. Exemple : récupérer les sorties d'un automate afin de détecter une anomalie.
– Puiser dans les catalogues les capteurs ou les mesureurs adaptés aux paramètres à surveiller. Exemple : mesurer le colmatage progressif d'un filtre par différence de deux pressions amont et aval (mesure de la perte de charge par pression différentielle).
– Imaginer des solutions inédites. Exemple : l'œil étant le premier outil de maintenance conditionnelle (et de CND), la simple observation de l'évolution de la fissuration d'une courroie permet de prévenir sa rupture intempestive.
– Acheter du matériel spécifique de maintenance conditionnelle. Exemple : acheter un analyseur de vibration, ses accéléromètres, son informatique associée et les formations nécessaires, si le nombre et la nature des « machines tournantes » le justifient.
– Sous-traiter la surveillance à des intervenants spécialisés. Exemple : le suivi des analyses de huile du parc de moteurs Diesel sera sous-traité au fournisseur de lubrifiant.

Dans cette démarche, les cas d'application de la maintenance conditionnelle sont démultipliés, pour des investissements initiaux souvent réduits.

Il nous semble important de démystifier et de banaliser la maintenance conditionnelle : elle n'est pas réservée aux seules grosses entreprises, certaines de ses applications peuvent être très simples. Sentir une fuite de gaz, observer une fuite de liquide et prendre les mesures préventives d'un risque majeur ne nécessite ni instrumentation, ni connaissances compliquées.

Remarque

J'ai à l'esprit la remarque d'un responsable de maintenance d'une PME qui, à l'issue d'une conférence (bien faite) sur les analyses de vibrations, m'a dit : « Très intéressant tout ça, mais la maintenance conditionnelle, ce n'est pas pour nous : trop savante, trop

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

chère, et nous avons trop peu de machines tournantes ». Quel dommage, car j'avais la certitude que, sur son site, à chaque dégradation pouvait correspondre une prise en charge conditionnelle, et que certaines de ces prises en charge auraient été aisées et rentables.

2.3.4 La télémaintenance et la supervision

❑ **L'évolution technologique**

L'aéronautique a ouvert la voie de l'évolution de la maintenance « sur potentiel d'heures » (systématique) vers la maintenance « selon l'état » (conditionnelle). Le poste de pilotage étant devenu le centre « d'informations-décisions ».

Le développement des automates industriels et de l'informatique en réseau permet aujourd'hui de superviser un site industriel à distance, avec des écrans d'aide au diagnostic en « local ». Des synoptiques permettent la surveillance en temps réel des différents états d'un automatisme, donc le pilotage de la production. Mais aussi la détection des dérives pathologiques qui l'affectent (perte de normalité), donc le pilotage de la maintenance. En effet, à partir de cette détection, le « pilote » rentre dans une logique de maintenance conditionnelle, avec la prime décision : je continue en mode dégradé ou j'arrête ? Quels sont les risques et quelle procédure appliquer ? L'inévitable « remise à niveau » (ça ne s'arrange pas tout seul) doit-elle se faire immédiatement ou de façon différée ?

Remarquons que l'investissement « lourd » de la supervision d'un équipement ou de la télésurveillance de l'ensemble d'un site industriel est à partager entre production et maintenance.

❑ **Illustration du principe de la télésurveillance**

L'instrumentation requise schématisée par la figure 2.13 permet une surveillance en temps réel de la succession des états « normaux » du système. Elle permet aussi la détection des phénomènes pathologiques dont les symptômes sont transmis par réseau au superviseur. Celui-ci doit alors appliquer la procédure prévue : agir par arrêt général, par neutralisation locale ou par reconfiguration du système.

❑ **Les limites et les risques de la télésurveillance**

☐ **Défaillance du système de supervision**

Cette défaillance « isolera » le superviseur de la réalité du terrain. Situation grave pouvant amener des mauvaises décisions, ou pas de décision, ou l'application de procédures inappropriées. L'ensemble du système doit donc être fiable à l'origine, testé périodiquement puis « maintenu » en bon état.

☐ **Défaillance du superviseur**

Travaillant souvent sous forme de permanences en 3 × 8 avec astreintes, les superviseurs ne sont pas des surhommes : ils peuvent être victimes de défaut de vigilance, d'erreurs d'interprétation ou de problèmes physiologiques. Parfois d'une formation insuffisante ou d'une ergonomie insuffisamment pensée de leur poste de travail (entrefactage d'images numériques ou confusion de signaux, par exemple).

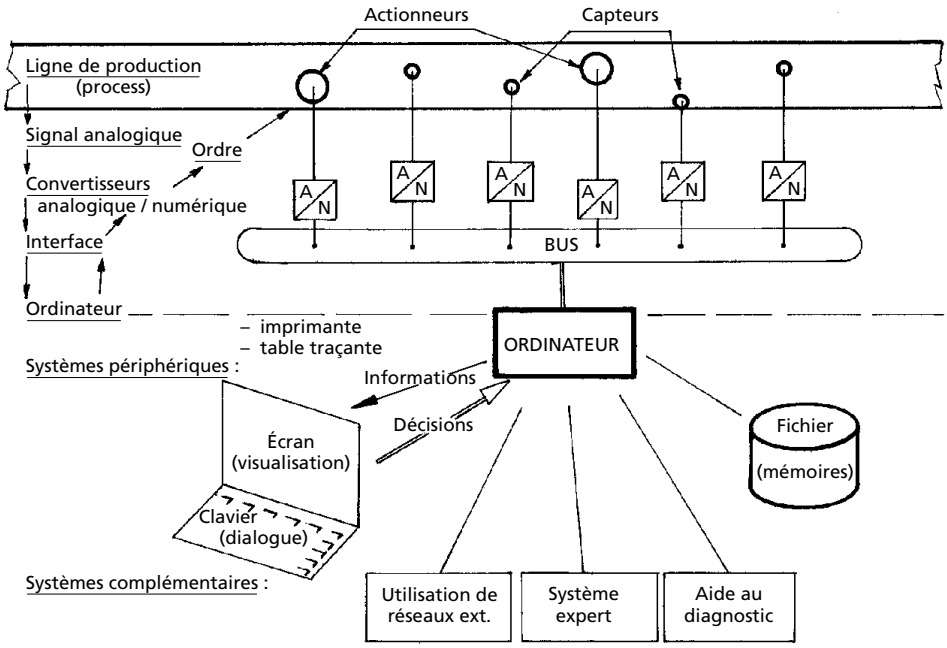


Figure 2.13 – Principe de la télésurveillance

☐ **Défaillances non attendues**

Nous ne pouvons détecter que les seules défaillances attendues, donc «instrumentées» et surveillées. Un exemple caractéristique est la fuite d'un gaz odorant. Elle est plus facile à détecter par un technicien présent que par une instrumentation, même sophistiquée. Les exemples d'accidents en raffinerie nous prouvent la nécessité de trouver un juste équilibre entre la télésurveillance centralisée et le maintien de rondes *in situ*. Afin de garantir la sécurité et la disponibilité des équipements, la présence humaine reste le complément indispensable de toute télésurveillance centralisée.

2.3.5 Les outils de la maintenance conditionnelle

Nous avons vu que nous pouvons mettre en œuvre de la maintenance conditionnelle en étant « imaginatifs » à partir de la méthodologie proposée. Ce n'est pas une raison pour ne pas connaître et utiliser les outils « clés en main » existant dans le commerce, ou proposés par des entreprises de service.

❑ **Principaux outils spécifiques**

Les trois principaux outils spécifiques sont les suivants.

☐ **Mesureurs et analyseurs de vibrations**

Adaptés à la maintenance conditionnelle des machines tournantes (pompes, alternateurs, ventilateurs, centrifugeuses, etc.), mais aussi de certains processus continus (machines à papier, coulée continue, etc.) et de machines à mouvements alternatifs (moteurs thermiques, compresseurs, etc.).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

□ **Analyses d'huiles**

Service proposé par les groupes pétroliers fournisseurs de lubrifiants, et adaptés à la maintenance des moteurs Diesel, des circuits hydrauliques et des systèmes mécaniques pour lesquels la qualité de l'huile est prédominante pour la durée de vie (gros réducteurs par exemple).

Ces deux outils sont décrits et développés dans le paragraphe 6.5 et certains ouvrages leur sont entièrement consacrés, tels (MOB 92) et (BOU 99).

□ **Thermographie infrarouge**

Cet outil est coûteux (caméra vidéo + imagerie numérique + logiciel associé pour stockage d'images), mais il est très polyvalent. Donnant une « image thermique » d'une zone suspecte, la thermographie IR permet de détecter à distance :

– des ponts thermiques en contrôle d'isolation pour économie d'énergie,

– des points chauds en équipements électriques (bobinage moteur, conducteur sous-dimensionné, contrôle d'armoires électriques à distance…),

– des points chauds en mécanique (dégradation d'un palier),

– des points chauds en blindage de four (usure de réfractaire),

– des fuites (en canalisations enterrées).

Tous ces exemples prouvent la polyvalence de cet outil. Son utilisation spécifique en maintenance conditionnelle passe par une prime image de référence, puis par l'analyse comparative des images successives. Il est parfois possible d'établir une corrélation entre les températures relevées et le phénomène pathologique surveillé (exemple : corrélation entre le gradient thermique d'un four et les centimètres de réfractaire en cours d'usure).

❑ **Les CND (contrôles non destructifs)**

Comme leur nom l'indique, les CND ont vocation à contrôler l'état de pièces en cours ou en fin de fabrication. Mais leur utilisation en maintenance conditionnelle est envisageable comme outil permettant de visualiser des défauts débouchants ou internes. Le CND choisi permet de suivre leurs évolutions jusqu'à un seuil prédéterminé correspondant à un risque à prévenir, souvent une rupture mécanique. Toute fissure est une amorce de rupture.

□ **Cas d'application**

En mécanique, les évolutions de fissures précèdent les dégradations de surfaces fonctionnelles ou les ruptures. Ces fissurations « amorces de rupture » se trouvent principalement :

– sur toute pièce, dans les zones de concentration de contraintes (pour les arbres de transmission : gorges, épaulements, etc.);

– sur les dents d'engrenages, en pied de denture du profil;

– sur les surfaces de roulement ou de frottement, en cas de surcontraintes;

– pour les soudures, en limite de cordon.

Exemple : dégradation d'une surface soumise au roulement

La fatigue hertzienne provoque la fissuration d'une sous-couche évoluant vers un « écaillage » à prévenir.

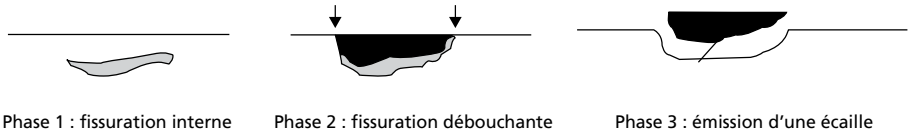


Figure 2.14 – Principe de l'écaillage d'une surface de contact

De nombreux CND permettent de détecter la présence d'un défaut interne en phase 1. Citons les ultrasons et la radiographie.
En phase 2, le ressuage, l'analyse des ondes de choc générées par le passage de l'élément roulant, puis l'observation visuelle permettent de connaître la présence de réseaux de fissures débouchantes. La mise en œuvre d'un de ces moyens doit anticiper l'écaillage de la phase 3, défaillance dangereuse par le fait que les particules métalliques libérées, portées par un lubrifiant, vont dégrader d'autres portées.

☐ **Quelques outils CND et leurs applications possibles en maintenance**

– L'œil et ses « prolongements technologiques ». L'œil est le premier des CND, par observation directe de zones suspectes. Ses « accessoires » vont du microscope électronique à l'endoscope qui permet, par exemple, l'observation in situ des dommages d'une denture d'engrenage sans avoir à démonter le réducteur.
– Les radiographies (X, γ, neutronographie, etc.) sont adaptées aux contrôles de la « santé-matière » et le suivi de défauts internes. Mais les sources radioactives sont soumises à une stricte réglementation limitant leur usage. Certaines radiographies doivent être réalisées dans des locaux spécifiques, excluant l'utilisation *in situ* fréquente en maintenance.
– Les ultrasons couvrent le même champ d'utilisation, mais à partir de matériel plus facile à mettre en œuvre sur site. Ils sont très utilisés en contrôle de soudures, mais ils requièrent une spécialisation poussée de la part des opérateurs.
– La magnétoscopie et les courants de Foucault voient leur utilisation limitée aux seuls matériaux ferromagnétiques et à la recherche de défauts superficiels.
– Le ressuage est très utilisé pour la mise en évidence de fissures débouchantes.

Bien d'autres CND existent avec des champs d'application très spécialisés, ce qui les rend peu pratiques en maintenance « généraliste ».

La mise en œuvre de la plupart des CND présente trois problèmes pour leur utilisation en maintenance :

– la plupart demandent un investissement dont le temps de retour n'est pas évident à évaluer ;
– ils demandent une spécialisation des techniciens chargés de leur mise en œuvre, d'où un recours fréquent à de la prestation de service ;
– ils demandent une bonne connaissance préalable des pathologies à prévenir (nature et localisation).

Il faut savoir que l'on ne trouvera, avec un outil CND, que ce que l'on cherche !

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

2.4 Les autres activités du service maintenance

2.4.1 Les cinq niveaux de maintenance

La maintenance est caractérisée par une très grande variabilité des tâches, en natures comme en durées. D'où l'utilité de jeter les bases de son organisation à partir d'une mise en familles à cinq niveaux (tableau 2.2), suivant la norme AFNOR X 60-000. La tendance actuelle est de se ramener à trois niveaux seulement, dans une logique de TPM. À savoir :

I = 1 + 2 : c'est la maintenance « de permière ligne » transférée progressivement aux opérateurs de production, assistés si nécessaire par les techniciens de maintenance de l'antenne sectorisée ;

II = 3 + 4 : domaine d'action privilégié des équipes polyvalentes de techniciens de maintenance. Diagnostics, interventions techniquement évoluées, mise en œuvre d'améliorations, etc. ;

III = 5 : travaux spécialisés souvent sous-traités pour que la maintenance puisse recentrer ses moyens sur son savoir-faire (le niveau II).

Tableau 2.2 – Les cinq niveaux de maintenance

Niveau	Personnel d'intervention	Nature de l'intervention	Moyens requis
1	Exploitant, sur place	Réglage simple d'organes accessibles sans aucun démontage, ou échanges d'éléments accessibles en dans les consignes de toute sécurité conduite.	Outillage léger défini dans les consignes de conduite
2	Technicien habilité (dépanneur) sur place	Dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou opérations mineures de maintenance préventive	Outillage standard et rechanges situés à proximité
3	Technicien spécialisé, sur place ou en atelier de maintenance	Identification et diagnostics de pannes, réparations par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, de contrôle
4	Équipe encadrée par un technicien spécialisé, en atelier central	Travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Révisions	Outillage général et spécialisé
5	Équipe complète polyvalente, en atelier central	Travaux de rénovation, de reconstruction, réparations importantes confiées à un atelier central Souvent externalisés	Moyens proches de ceux de la fabrication par le constructeur

2.4.2 Révisions, rénovations et reconstructions

❑ **Les révisions périodiques**

☐ **Définition CEN de la révision**

« Ensemble complet d'examens et d'actions réalisés afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité. »

☐ **Commentaires**

Nous avons vu les révisions en maintenance systématique, car les échéances de révisions sont programmées en unités d'usage (temps de fonctionnement cumulé) ou en temps calendaire suivant la méthode ABAC-ABAD.

Une révision demande une expertise préalable et un démontage partiel ou total du bien. Bien que de vocation préventive, elle est l'occasion d'une remise à niveau comprenant des réparations (donc du correctif) ayant pu « attendre » l'échéance.

Une révision peut être limitée (période de 3 ou 6 mois par exemple) ou générale (période souvent annuelle et confondue avec l'arrêt annuel de l'ensemble du site). Les révisions comme les arrêts sont des travaux « lourds » (en charge de travail). Ils sont préparés suivant l'expertise sur site, programmés et font souvent l'objet de travaux sous-traités.

❑ **Les rénovations et les reconstructions**

☐ **Définition CEN de la reconstruction**

« Action suivant le démontage du bien principal et le remplacement des biens qui approchent de la fin de leur durée de vie et/ou devraient être systématiquement remplacés. »

☐ **Commentaires**

L'objectif de la reconstruction est de prolonger la durée de vie utile d'un équipement, pour un coût compris entre 50 % et 70 % du coût du remplacement à neuf. De plus, c'est souvent l'occasion de modifications et de modernisation sur un bien que l'on connaît.

La reconstruction implique le remplacement de toutes les pièces sensibles (au vieillissement, à l'usure, à la corrosion, etc.) par des pièces d'origine, et la conservation des ensembles « structurels » après expertise de leur bon état. « Faire du neuf avec du vieux » ne correspond pas forcément à une attitude dépassée, ou à du bricolage, mais à une solution réaliste face à des contraintes économiques sévères.

La rénovation est une forme intermédiaire de remise à niveau entre la révision et la reconstruction.

La « cannibalisation » consiste à récupérer, sur des matériels déclassés à rebuter, des éléments en bon état, de durée de vie potentielle connue, et à les utiliser comme pièces de rechange ou comme éléments de rénovation.

La modernisation consiste à substituer des composants d'une nouvelle génération technologique à des composants âgés. Par exemple le remplacement d'une commande à relais par un automate programmable est une modernisation.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Notons que chacune de ces actions implique une mise à jour des « dossiers techniques d'équipement ».

2.4.3 Les « arrêts périodiques »

L'expérience montre qu'il est indispensable d'arrêter périodiquement le fonctionnement de certaines installations, donc la production, pour effectuer une « remise à niveau » générale. Ces arrêts sont généralement programmés tous les ans en été, période de ralentissement des activités économiques industrielles.

Les travaux sont externalisés pour une grande partie. Définis après expertise des installations, ils sont longuement préparés (souvent pendant plusieurs mois), programmés et gérés comme des « chantiers ». C'est l'occasion de procéder à des améliorations, mises en conformité, modernisations, rénovations envisagées précédemment. Le rôle des méthodes-maintenance est donc prépondérant dans la préparation (voir § 6.5.2) et la gestion (voir § 7.2) de ces arrêts.

2.4.4 Les études et travaux neufs

❑ **Situation**

Environ 70 % des services maintenance ont la charge (légitime) des « travaux neufs », au sens de la responsabilité de l'intégration d'équipements nouveaux dans l'infrastructure existante. Ces études sont « hors budget de la maintenance » car elles sont intégrées aux « investissements ».

La responsabilité peut commencer en amont, au niveau de l'ingénierie de l'entreprise chargée de la définition des nouveaux procédés. La participation de la maintenance à l'origine en partenariat avec la production est une garantie « anti-mauvaises surprises » quant à l'intégration des nouveaux matériels dans l'existant.

❑ **Les responsabilités des travaux neufs**

☐ **Contenu**

– Participation au programme d'investissement (voir § 10.4).
– Avis quant au choix du matériel, par la prise en compte de la maintenabilité, de la qualité du SAV, de la qualité des dossiers techniques, de la standardisation des constituants par rapport au parc existant, de la logistique de soutien, etc.
– Étude de la réglementation relative au système à implanter, de la sécurité, de l'impact environnemental, etc.
– Réalisation de l'étude de l'installation : l'implantation, définition des accès, étude des réseaux, des raccordements, des énergies, des rejets, etc.
– Formation des techniciens de maintenance en partenariat avec le fournisseur. Par exemple, participation des techniciens au montage et aux essais de l'équipement chez le fournisseur.
– Réception technique du matériel, vérification de la conformité aux normes et à la commande.

– Réalisation de l'installation, définie par la norme X 60-011, comme étant « la mise en place du bien et de ses accessoires, et le raccordement de ses diverses entrées et sorties aux équipements adjacents ».
– Mise au point, comprenant l'ensemble des essais préliminaires, réglages et modifications nécessaires à l'obtention de « l'état spécifié ». La collaboration avec des équipes de techniciens du fournisseur peut être fructueuse.
– Mise en service, après vérification de la conformité aux performances contractuelles : c'est la « recette » du bien.
– Transfert des documents techniques et des connaissances acquises vers le bureau des méthodes de maintenance, souvent et heureusement voisin.

Les services Entretien étaient souvent tenus à l'écart de ces tâches : prenant en charge le matériel à l'issue de la période de garantie, les dépanneurs ne pouvaient que « subir », découvrant parfois en situation de panne qu'ils ne possédaient même pas les plans… Cette critique d'une situation révolue permet de mieux comprendre quels sont les avantages d'une structure « maintenance-travaux neufs ».

☐ **Avantages d'une structure maintenance-travaux neufs**

– Une meilleure connaissance du matériel dès l'origine, par le contact avec les techniciens « vendeurs », par la période d'apprentissage (le montage, les essais et la mise au point), par les dossiers techniques complets car négociés !
– Une prise en charge rationnelle par la maintenance informée au départ des objectifs de performances attendus pour l'exploitation de l'équipement.
– Moins de mauvaises surprises en cours d'exploitation.
– Et surtout un gain sensible sur le coût du cycle de vie de l'équipement à intégrer (voir § 10.4).

2.4.5 L'entretien des installations

❑ **Description**

Nous ne pouvons passer sous silence la responsabilité qu'assument beaucoup de services Maintenance face à l'entretien général du site.

Dans les grosses entreprises, services techniques et maintenance sont souvent distincts. Ce qui n'exclut pas une convergence des méthodes : le concept de « maintenance immobilière » est né de cette convergence.

Dans les PME, le service maintenance a souvent la charge :

– des installations, tels que bâtiments, clôtures, espaces verts, routes ;
– des aménagements, tels que canalisations, réseaux électriques, téléphoniques, d'eaux, ascenseurs, chauffage et climatisation, etc. Avec le développement technologique appliqué à l'immobilier (GTC par exemple), certains de ces travaux (parfois sous-traités) exigent de réelles compétences techniques ;
– du parc de véhicules et d'engins de manutention ;
– d'installations périphériques, telles que stations de pompage ou d'épuration.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Quelques remarques sur l'entretien général

La prise en charge « comptable » de ces travaux doit être différenciée des travaux de maintenance par saisie sur des comptes spécifiques. La logique d'organisation sur trois niveaux peut se calquer sur la maintenance :

– le petit entretien, de caractère fortuit est semblable à un dépannage. C'est le domaine du « Michel Morin » de service !
– l'entretien normal de routine évite la dégradation rapide du site et prévient des réparations coûteuses ;
– le gros entretien, semblable à une rénovation, est souvent confié à des entreprises extérieures.

Ces travaux d'entretien impliquent des métiers et des qualifications différents de ceux de la maintenance : peintres, menuisiers, jardiniers, personnel de nettoyage, plombiers, etc. Aussi se pose la question de l'externalisation de ces travaux, pour se recentrer sur les « métiers » caractéristiques de l'activité et de la culture de l'entreprise.

B

La connaissance des équipements et de leurs comportements

3 • LA MAÎTRISE DE LA DOCUMENTATION MAINTENANCE

3.1 La connaissance des équipements : aspects documentaires

3.1.1 Le système documentaire de la maintenance

❑ **Les besoins documentaires du service maintenance**

Il semble évident qu'aucune action technique importante et de qualité ne peut se faire en maintenance sans référence documentaire. Le développement de la fonction méthode va de pair avec sa responsabilité : « assurer la maîtrise de la documentation relative aux équipements », avec pour objectif principal la connaissance technologique et opérationnelle des équipements qui permet :

– la préparation d'interventions plus efficaces et plus sûres,

– l'aide aux techniciens d'intervention,

– la traçabilité des activités de terrain, aux fins d'amélioration de l'organisation,

– l'analyse du comportement des matériels, aux fins d'améliorations techniques et d'optimisation économique.

Il est évident que l'outil GMAO, par sa capacité à mémoriser et à traiter des données et par sa vitesse d'accès à l'information, sera le vecteur principal de la maîtrise documentaire. Nous pouvons dire que la qualité du système documentaire destiné à définir, localiser, faciliter, valoriser et optimiser les actions de maintenance est une condition nécessaire à la qualité de la maintenance.

❑ **La gestion documentaire dans le cadre de l'assurance qualité**

Tout système qualité implique la gestion de sa documentation suivant le principe :

– « écrire ce que l'on va faire » (préparation : définition des procédures),

– « faire ce que l'on a écrit » (intervention encadrée),

– « écrire ce que l'on a fait » (traçabilité).

Il appartient au service maintenance de développer son système documentaire en cohérence avec les procédures du système AQ (assurance qualité) de l'entreprise.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

En particulier, dans le cadre des référentiels ISO 9000, nous avons identifié les exigences de la norme en matière de documentation maintenance, avec deux procédures de base :

– la procédure générale de maintenance (PGM),

– le plan qualité de l'équipement (PQE).

Cette analyse des exigences de l'ISO 9000 fait l'objet du paragraphe 9.3 de cet ouvrage.

3.1.2 La classification du matériel

❑ Rappels normatifs

Documentation de maintenance : « information conservée sous forme écrite ou électronique nécessaire à l'exécution de la maintenance ».

Bien : « tout élément, composant, mécanisme, sous-système, unité fonctionnelle, équipement ou système qui peut être considéré individuellement ».

Immobilisation : « bien enregistré en comptabilité ».

En accord avec ces définitions, nous nommerons « biens immobilisés » ou « biens durables » les équipements figurant à l'inventaire, l'ensemble de ces équipements représentant le « parc matériel » de l'entreprise.

❑ Le champ de responsabilité du service maintenance

Le souci premier de tout responsable est de connaître son champ de responsabilité. Pour un responsable de maintenance, le problème est structurel : a-t-il la responsabilité des « services techniques » ou de la « maintenance de tout ce qui concourt à la production » ?

Suivant la taille, l'histoire, la topographie et le secteur d'activité de l'entreprise, toutes les formes d'organigrammes existent et sont justifiables. Nous allons donc traiter le cas le plus général : la responsabilité de l'ensemble du parc des biens durables, infrastructure comprise.

❑ Proposition de classification

□ Remarque initiale

Une première distinction est utile entre les biens durables liés ou non liés à la production.

– Biens liés à la production : « ils sont tels que tout arrêt ou dysfonctionnement du bien provoque un arrêt, un ralentissement, une perturbation ou une mauvaise qualité de la production ». Remarquons qu'un générateur d'énergie ou un robot de manutention ne sont pas des machines de production, mais rentrent dans ce cas.

– Biens indépendants de la production : « ils sont tels qu'une défaillance n'a aucune incidence sur la production ».

Une deuxième distinction peut être faite entre la « maintenance industrielle » des biens techniques et la « maintenance immobilière » des biens généraux.

□ Classification

Cet exemple est établi dans le cas le plus général de la prise en charge par la maintenance de l'ensemble des biens durables.

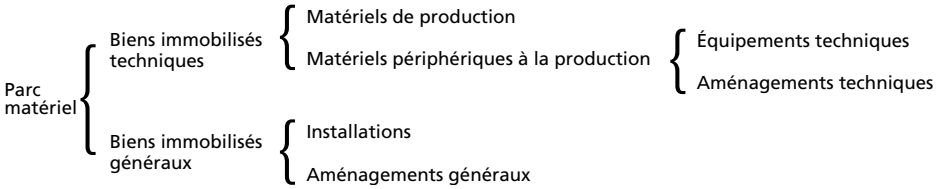


Figure 3.1

☐ Les matériels de production

Ce sont les systèmes et machines, isolées ou intégrées (lignes ou îlots de production) qui donnent de la « valeur ajoutée » au produit ou au service fabriqué.

> **Exemples**
>
> Machine outil à commande numérique (MOCN), colonne de distillation pour une raffinerie, avion pour l'aéronautique, congélateur pour un supermarché, table d'opération télécommandée pour un hôpital, etc.

Ces matériels représentent la cible naturelle de la maintenance : maintenir l'outil de production pour optimiser son exploitation.

☐ Les matériels périphériques à la production

Les équipements techniques peuvent être :

– des générateurs d'énergie, tels que poste HT, pompe d'alimentation en eau, chaudière à vapeur, cogénérateur, compresseur d'air, etc. ;

– des engins de levage, des systèmes de manutention, des équipements de stockage, etc. ;

– des stations d'épuration, de traitement de rejets, etc.

Les aménagements techniques peuvent être :

– des réseaux (canalisations de fluides, lignes électriques, etc.) ;

– des appareils de climatisation, de chauffage, d'éclairage liés aux ateliers.

☐ Les services généraux : les installations et leurs aménagements

– Les bâtiments (sols, toits, issues, etc.).

– Les terrains, espaces verts, clôtures, routes, etc.

– Les matériels de bureau, des cuisines, des magasins, etc.

– Les réseaux informatiques, téléphoniques.

– Les appareils de climatisation, de chauffage, d'éclairage, etc. liés aux infrastructures générales.

– Le parc de véhicules.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ **Qui est responsable de quoi ?**

La classification du parc et son indispensable arborescence, de même que la codification des équipements dépendront de la topographie de l'entreprise (différents secteurs d'activités) et de son organigramme.

Le découpage généré par la classification précédente implique de créer des « frontières » parfois artificielles, en concertation entre le responsable de la maintenance et le responsable de l'entretien général, lorsqu'ils sont séparés sur l'organigramme. C'est ainsi qu'à l'hôpital, le directeur technique a la responsabilité de la fourniture des gaz médicaux et de leurs canalisations, mais c'est l'ingénieur biomédical qui a la responsabilité de leur utilisation. Où est la frontière ?

La prise en charge du parc avec l'aide d'une GMAO a le mérite d'obliger les partenaires à bien définir ces règles du jeu, puisque le premier fichier à remplir est l'arborescence du parc et l'identification par codification des biens immobilisés !

3.1.3 Les éléments de connaissance documentaire d'un équipement

Potentiellement, tout « bien immobilisé » de l'entreprise est à prendre en charge par la maintenance. Nous nommerons « équipement » tout ensemble homogène assimilable à une machine, à un appareil ou à un système technique cohérent, composé d'une partie opérative (PO), d'une partie commande (PC) et des interfaces. Une arborescence amont ira du parc vers l'équipement : c'est l'inventaire.

Une arborescence aval analysera les constituants de cet ensemble, suivant le schéma de la figure 3.2.

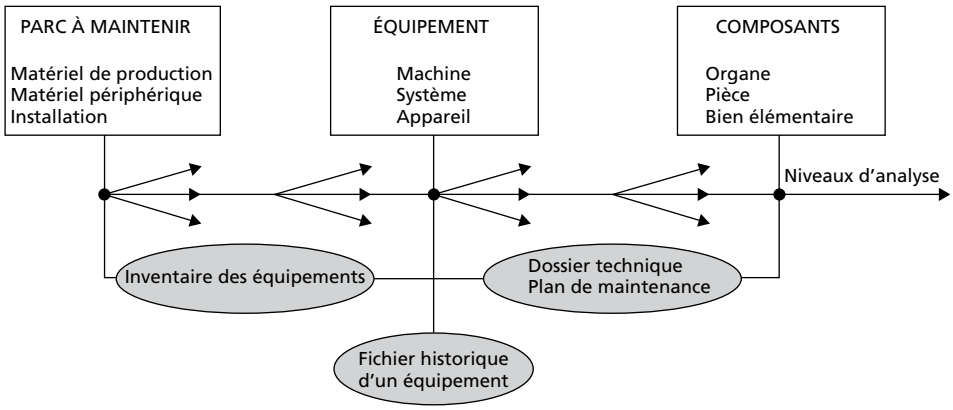


Figure 3.2 – L'équipement et sa situation documentaire

Nous présenterons dans ce chapitre 3 les quatre éléments de base d'un système documentaire cohérent, visant l'efficacité et l'économie des moyens. Il comprendra :

1. l'inventaire des équipements à maintenir,
2. le dossier technique d'un équipement (DTE),
3. le plan de maintenance d'un équipement,
4. le fichier historique d'un équipement.

3.2 L'inventaire du parc matériel, fichier de base de la GMAO

3.2.1 Définition et commentaires

L'inventaire des biens durables d'un site industriel est une nomenclature codifiée de tous les équipements à maintenir. Il est établi suivant un découpage arborescent du parc, fonction de la classification choisie.

L'inventaire et sa codification constituent le premier fichier à remplir lors d'une prise en charge de la gestion de la maintenance au moyen d'une GMAO. Fichier de base d'une GMAO, il va conditionner toutes ses fonctionnalités : par exemple, une intervention corrective sera imputée en temps et en coût à un équipement donné par sa codification.

Remarque

C'est un document (ou une saisie) long à établir, mais facile à tenir à jour : il n'y a pas un équipement à intégrer ou à déclasser tous les jours.

3.2.2 Découpage fonctionnel du parc matériel

Les mises en familles sont à adapter au contexte. Le découpage de la figure 3.3 est donc un exemple d'inventaire.

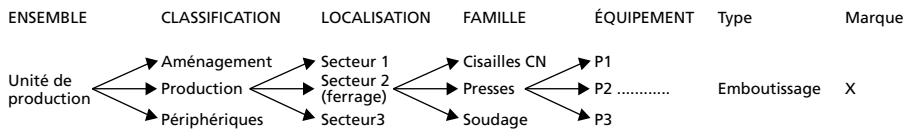


Figure 3.3

Lorsque nous aurons à identifier des équipements à l'intérieur de systèmes intégrés et complexes, nous serons amenés à dégager des « frontières » parfois artificielles entre les équipements. Ainsi, une « ligne de production » sera décomposée en « tronçons », puis chaque tronçon en « machines », chaque machine étant identifiée comme un équipement pris en responsabilité par la maintenance – de façon documentaire d'abord, puis en actions ensuite.

3.2.3 La codification et ses problèmes

Il faut distinguer la codification « idéologique » utile aux traitements manuels, opposée à la codification « aveugle » pour traitement informatique. Dans le premier cas, on utilise une codification alpha-numérique. Dans le second, les GMAO proposent une capacité de n rangs numériques. Une bonne codification doit permettre :

– l'identification d'un équipement donné au sein du parc, sa famille et sa localisation ;
– la nomenclature des fichiers GMAO s'y rapportant (composants, pièces de rechange, fournisseurs et état du stock, dossiers documentaires, historique, etc.) ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– l'imputation à l'équipement de toutes les natures d'interventions s'y rapportant ;
– le regroupement avec tous les équipements semblables situés ailleurs. Par exemple, il est indispensable de pouvoir « appeler » à partir de leur code les 1 200 pompes centrifuges disséminées sur les trois dimensions d'une papeterie ;
– l'identification des « lignes de maintenance » formées d'équipements de durées de fonctionnement communes (mises en route et arrêts simultanés) faciles à gérer en maintenance systématique.

Attention

1. Cette codification « interne » à la maintenance va se recouper avec d'autres codifications relatives à l'équipement : références de la comptabilité analytique, références d'inventaire des investissements, références du constructeur, du distributeur. Il faut réduire les doublons et éviter les confusions. Par exemple, en maintenance aéronautique, le même composant électronique peut avoir une référence Airbus, une référence Boeing et une référence de chacun des trois fabricants : si l'on ne veut pas multiplier les « tiroirs » contenant des pièces identiques, sous quel intitulé classe-t-on ce composant ?
2. Dans une GMAO, la définition initiale de la codification est irréversible, car elle forme la « colonne vertébrale » du système.

3.3 Le dossier technique équipement (DTE)

3.3.1 La logique de conception du DTE

L'efficacité du travail de préparation du bureau des méthodes maintenance et des équipes d'intervention repose sur une bonne connaissance des équipements à maintenir. Connaissance exhaustive du matériel (origine, technologies et performances) et de sa « santé » (défaillances et actions correctives et préventives). Cette dernière sera connue par le fichier historique défini au paragraphe 3.5.

Le DTE (appelé communément le dossier machine) a pour vocation de mettre à disposition des préparateurs et des intervenants toutes les informations relatives à l'équipement susceptibles de les aider. Il comprendra deux ou trois parties :

– le dossier constructeur, avec toutes les informations d'origine, négociées et fournies par le constructeur ;
– le dossier interne, établi et tenu à jour par le bureau des méthodes de maintenance ;
– le plan de maintenance, défini au paragraphe 3.4 et mis sous informatique, peut être intégré (cas d'un petit équipement) ou non au DTE.

Le DTE étant conçu pour être opérationnel, il doit présenter les informations :

– sous la forme la plus utile à leur exploitation, en préparation ou en intervention ;
– proportionnellement à la « criticité » de l'équipement : un touret à meuler n'a pas besoin du même DTE que la machine « goulet d'étranglement » de la production.

Trop d'informations nuisent à l'efficacité du DTE, pas assez le rendent inutilisable, donc inutile.

3.3.2 L'arborescence d'un équipement : découpage structurel

❑ **Exemple de découpage**

Suivant sa complexité, l'équipement sera décomposé en différents niveaux comme le montre l'exemple de la figure 3.4.

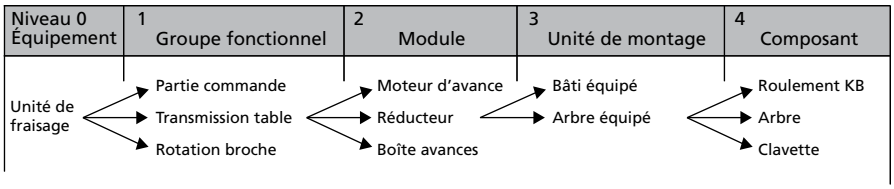


Figure 3.4

❑ **Commentaires**

La liste des composants forme la nomenclature, rattachée au module correspondant. Le module est une entité importante en maintenance, car il représente le premier niveau où se localisent les défaillances et où s'exerce l'action de maintenance. À partir du module, on peut se poser la question : je consomme ou je répare. Si je consomme, le problème du module de rechange et de son identification se pose. Sinon, c'est au niveau des composants que se pose le problème des rechanges et de leurs identifications.

Il est donc indispensable d'avoir le code et les spécifications de chaque sous-ensemble ou composant susceptible d'une prise en charge en maintenance. Le DTE doit rassembler tous ces éléments d'information, à partir du découpage effectué par le bureau des méthodes qui forme « l'architecture » du dossier.

Les nomenclatures sont trop souvent négligées dans les implantations des GMAO. Elles permettent pourtant :

– de sélectionner plus sûrement une pièce par la nomenclature de l'équipement que par les classifications du stock ;
– de purger du stock les pièces spécifiques d'une machine devenue obsolète ;
– de faire des analyses en vue d'établir les plans de maintenance.

L'utilisation d'un scanner équipé d'un logiciel de reconnaissance de caractères (OCR : *Optical Character Recognition*) qui dresse les listes de pièces sous Excel permet de relever en une ou deux semaines les nomenclatures d'une usine moyenne et ce en scannant les documents techniques.

3.3.3 La constitution d'un DTE

❑ **Partie a : le dossier constructeur**

En accord avec sa logique de conception, le DTE doit contenir la mémoire des documents contractuels relatifs à la fourniture :

– le cahier des charges et l'appel d'offre ;
– le bon de commande et les documents contractuels dont la garantie (période et contenu) ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– les références du SAV, du distributeur, du représentant local, etc.

Il doit également contenir des documents techniques caractérisant l'équipement. Il appartient au service maintenance, lors de la négociation d'achat, d'exiger les documents qui lui seront utiles ultérieurement, à savoir :

– les caractéristiques de la machine : capacité, performances, consommation, puissance installée ;
– la liste des accessoires ;
– la nomenclature des rechanges avec leurs références ;
– les plans et schémas électriques, pneumatiques, hydrauliques, etc., les « grafcet » « gemma » et la caractérisation des automates programmables ;
– la notice de mise en action : élingage, manutention, fondation et scellement, encombrement, branchements et connexions, rodage, réglages, vérifications, etc. ;
– la notice de fonctionnement, avec la mise en route, les règles de conduite, les consignes de sécurité, etc. ;
– la notice d'entretien, avec la lubrification préconisée (fréquences, natures et points à graisser) et les conseils de nettoyage ;
– les éléments de maintenance que le fournisseur peut préconiser : liste d'outillage spécifique, testeurs, aide au dépannage, points à surveiller, etc.

❑ **Partie b : le dossier interne du bureau des méthodes**

Il appartient au bureau des méthodes d'établir des DTE :

– de forme standardisée en interne ;
– classés à partir du code de l'inventaire ;
– contenant les rubriques (voir tableau 3.1) utiles aux intervenants, soit par intégration de documents fournisseur, soit par intégration des documents élaborés par les « méthodes » à partir de l'arborescence de l'équipement ;
– tenus à jour : chaque modification doit être portée, car la recherche d'une panne à partir de schémas faux est spécialement délicate !

Tableau 3.1 – Exemples de rubriques constituant un dossier technique d'équipement (standard interne)

Nom équipement :... Code inventaire :... Code état :... Indice de criticité :...	
Repère	**Titre des rubriques**
00	Sommaire
01	Fournisseur, contrat de commande,
02	PV de réception
03	Caractéristiques, fiches techniques

Repère	Titre des rubriques
04	Découpage structurel, arborescence,
05	Plans d'ensemble, de détails, schémas, etc.
06	Notice d'installation et de mise en service
07	Notice de conduite
08	Consignes permanentes de sécurité
09	Notice d'entretien, de nettoyage
10	Notice de lubrification
11	Liste générale des constituants
12	Liste des rechanges, avec plans, références et fournisseurs
13	Liste des outillages spécifiques
14	Liste des défaillances prévisibles
15	Schémas logiques d'aide au diagnostic – dépannage
16	Gammes types des opérations répétitives
17	**Plan de maintenance**
171	Consignes permanentes de poste
172	Plan de surveillance
173	Plan de maintenance systématique
174	Plan de maintenance conditionnelle
175	Préparation des actions correctives « attendues »

❑ **Quelle forme matérielle donner aux DTE ?**

☐ **À qui sert-il ?**

– Le DTE est un outil de travail du préparateur : c'est le dossier de référence du bureau des méthodes sous forme de classeurs ou d'écrans informatiques. Chaque préparateur étant « sectorisé », il a la responsabilité des DTE des équipements de son secteur.

– C'est aussi un outil de travail des équipes de terrain qui doivent avoir accès rapidement aux informations utiles, et pouvoir en disposer *in situ* : dans ce cas, l'écran

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

informatique n'est pas forcément le meilleur support quand on travaille sous la pluie sur un échafaudage ! Il faudra donc déterminer la forme la plus pratique, par panachage entre écrans et supports papiers (plans, schémas, photographies, etc.).

Notons que des entreprises prestataires de service proposent d'établir des dossiers machines en utilisant les outils de la PAO (perspectives « éclatées », photos légendées, etc.), difficiles et coûteux à faire soi-même.

☐ **Quel volume lui donner ?**

Un volume lié à la criticité relative du matériel et à sa complexité technologique. Le DTE sera ainsi complet ou « allégé », mais toujours standardisé.

La détermination de sa criticité relative se fera par examen des conséquences d'une défaillance :

– sous critère sécuritaire : quels sont les risques humains et environnementaux ?

– sous critères économiques : quel est l'impact sur la production, sur la qualité, sur les délais ?

Suivant la complexité de l'équipement, le plan de maintenance sera intégré au DTE, dans le cas des petits équipements, ou développé à part.

3.4 Le plan de maintenance

3.4.1 Définition et intérêt du plan de maintenance

Le plan de maintenance est un document synthétisant les éléments de la prise en charge par la maintenance d'un équipement donné. Il figurera éventuellement dans le DTE (dossier technique d'équipement) et décrira les paramètres des interventions correctives et préventives préparés par le bureau des méthodes. Sur support informatique, ce document évoluera au fur et à mesure de l'apprentissage du comportement de l'équipement et en fonction des critères de variabilité étudiés ci-après.

3.4.2 Variabilité de la prise en charge préventive

La lecture du chapitre 2 pourrait laisser croire que la prise en charge préventive d'un équipement par le service maintenance est soit systématique, soit conditionnelle. Il n'en est rien, et le choix entre les formes de maintenance se fait au niveau de chaque module, voire au niveau de certains composants fragiles. Et il se fait également en fonction de l'environnement économique de l'entreprise, de ses moyens et de ses objectifs.

❑ **Variabilité dans l'espace**

La première chose à faire est d'évaluer le niveau de criticité de chaque équipement, suivant des critères de sécurité, de qualité ou de productivité. Puis, par analyse descendante, de sélectionner les sous-ensembles « sensibles ». C'est sur eux que nous choisirons la forme de prise en charge la mieux adaptée. Par contre, quel que

soit l'équipement, il doit y avoir une cohérence des politiques de maintenance pour l'ensemble du site de production, voire pour le groupe industriel.

Pour la maintenance systématique, il est souhaitable de définir une codification des périodes *T* suivant le principe ABAC-ABAD applicable à tous les équipements gérés en temps calendaire (voir § 2.2.4).

Pour la maintenance conditionnelle, les investissements en appareillages spécifiques peuvent être rentabilisés par une utilisation étendue à l'ensemble du site, mais non pour résoudre un problème isolé. De même, une télésurveillance ne se comprend que centralisée.

❑ Variabilité dans le temps

Il n'existe pas une prise en charge préventive optimisée et permanente : le même équipement peut produire pendant 5 ans en limite de capacité, puis produire en « surcapacité » les années suivantes (pertes de marchés, fin de vie d'un produit). Dans la première phase, tout ce qui peut prévenir un arrêt fortuit est indispensable. Dans la seconde, une maintenance préventive « plus économique » sera requise.

D'autre part, les défaillances « de jeunesse » n'étant pas de même nature que les défaillances aléatoires, puis « de vieillissement », les méthodes de préventif devront s'y adapter.

❑ Optimisation du plan de maintenance

Le plan de maintenance d'un équipement est donc un document de synthèse qui doit évoluer : c'est le rôle des agents des méthodes en fonction des choix politiques de l'entreprise.

□ Le plan de maintenance initial

L'élaboration d'un plan de maintenance correctif et préventif est un des éléments du SLI (soutien logistique intégré) développé au paragraphe 10.4. L'utilisateur est amené à négocier l'existence et le contenu du plan de maintenance attaché à tout nouvel équipement, au même titre que le DTE.

Le cahier des charges d'acquisition d'un nouvel équipement doit contenir ces éléments d'intégration, sous la responsabilité des « travaux neufs ».

Notons que la démarche MBF développée dans au paragraphe 10.3 s'appuie d'abord sur une l'élaboration rationnelle d'un plan de maintenance initial qui se veut simple et efficace.

□ Faire évoluer le plan de maintenance

Quel que soit le modèle d'organisation de la maintenance choisi, le plan de maintenance est appelé :

– à évoluer sous l'influence des critères de variabilité étudiés ci-dessus ;

– à être optimisé par l'exploitation du retour d'expérience interne réalisée par les agents des méthodes ou par l'application d'une technique de benchmarking (voir § 10.1.3) ;

– à être arrêté lorsque le matériel devient obsolescent.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

3.4.3 Structure d'un plan de maintenance

Le plan de maintenance est l'outil de gestion qui va synthétiser la prise en charge d'un équipement par la maintenance. Pour matérialiser cette synthèse, de nombreux modèles de plans existent; contentons-nous d'en donner la structure générale à intégrer sous GMAO.

Tableau 3.2

Équipement :	Arborescence : sélection des sous-ensembles fragiles									
Indice de criticité :	Modules					Composants fragiles				
Prise en charge	30	50	60	90		103	209	405	408	Autres
Corrective										X
Rondes/surveillance	X					X				
Systématique	X		X					X	X	
Conditionnelle		X		X			X			

Le tableau 3.2 montre schématiquement le principe d'établissement d'un plan de maintenance, chaque croix étant un problème de prise en charge à résoudre suivant les méthodes décrites pour chaque type de maintenance.

Le module 30 est changé périodiquement à T_{30}, après inspection (vérification du bien fondé de l'I_{ps}).

Le module 60 est changé à T_{60} sans vérification.

Les modules 50 et 90 sont changés (ou remis à niveau) aux seuils prédéterminés.

La pièce 103 est surveillée : on apprend à connaître son comportement.

Les autres pièces seront remplacées ou réparées après défaillance (acceptée).

3.4.4 Contenu d'un plan de maintenance

À chaque croix du tableau 3.2 correspond un type de maintenance à mettre en œuvre et la fiche de préventif à élaborer. La préparation de cette fiche d'automaintenance, de systématique ou de conditionnel précisera les paramètres d'intervention :

– le descriptif de l'intervention I_{ps} ou I_{pc} (gamme d'opérations);
– la durée prévue (allant jusqu'à l'estimation de la charge annuelle de travail dans le cas de la maintenance systématique);
– les fréquences (cas d'une I_{ps}) ou les seuils (cas d'une I_{pc}) qui vont déclencher l'ordre de travail préventif;
– la qualification requise du personnel d'intervention;
– les moyens de soutien nécessaires (documentation, outillages spécifiques, rechanges, etc.).

Dans une logique d'organisation ISO 9000, nous nommerons PQE le plan qualité d'un équipement détaillé au paragraphe 9.3.5.

Il distinguera le plan de surveillance (consignes permanentes d'entretien, de sécurité, de réglage, de lubrification, etc.) du plan de maintenance (descriptif de toutes les opérations et instructions techniques). Il définira aussi les paramètres de traçabilité des interventions au moyen de feuilles d'enregistrement.

3.4.5 Choix de la forme de maintenance à mettre en œuvre : l'aide à la décision

Afin d'aider au choix de la forme de maintenance à mettre en œuvre, des outils « d'aide à la décision » existent, dont nous donnons deux exemples. La figure 3.5 se rapporte à un « arbre de décision » orientant l'agent des méthodes sur une des formes de maintenance envisageable a priori.

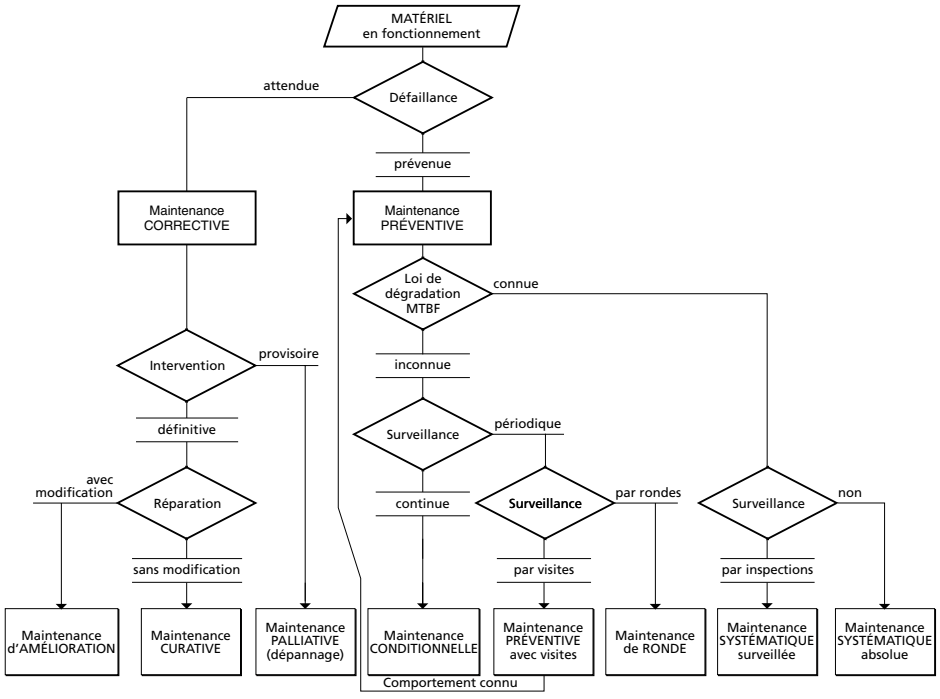
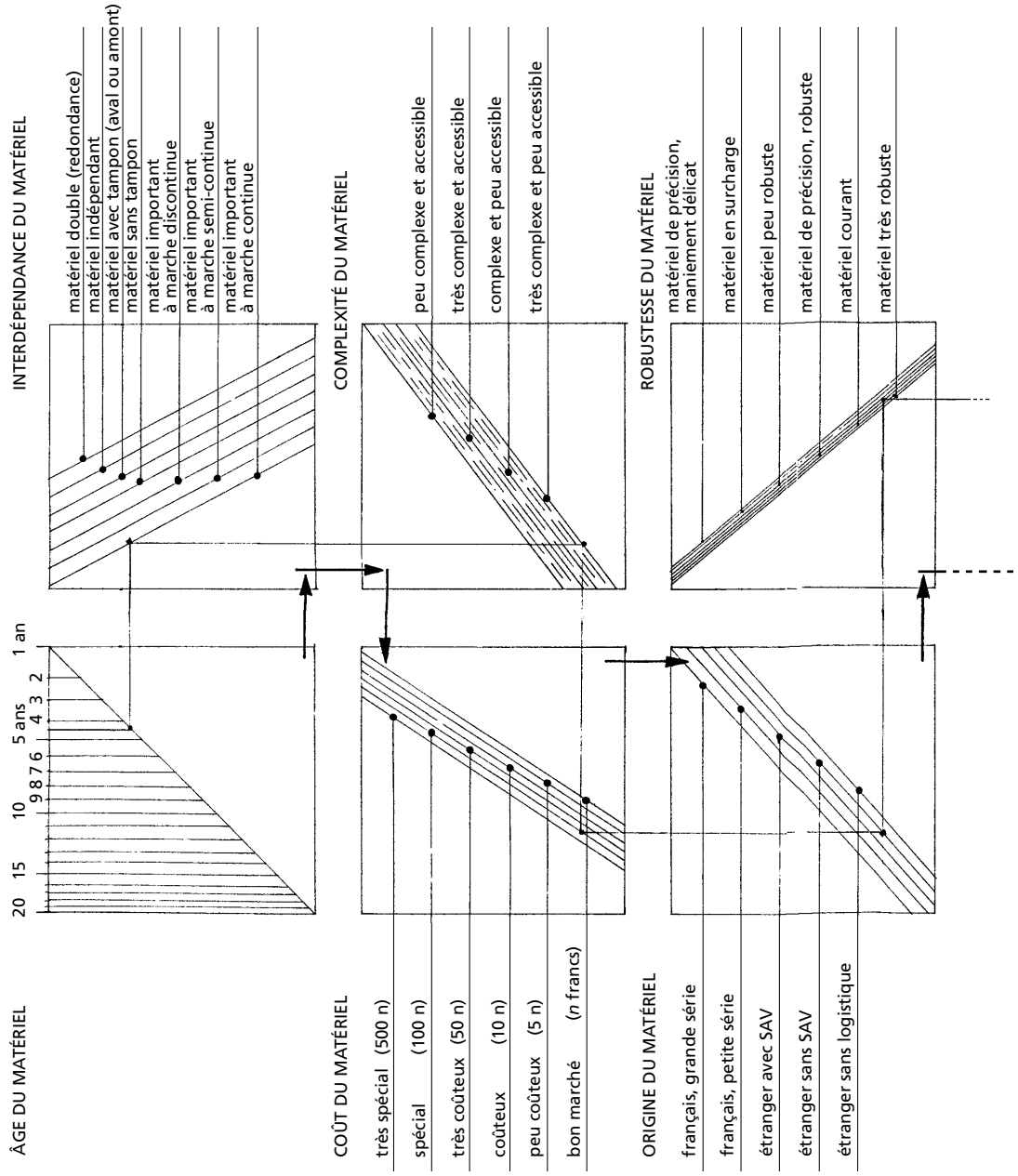


Figure 3.5 – Exemple d'arbre de décision pour choisir la forme de maintenance adaptée à un sous-ensemble

La figure 3.6 représente l'abaque multicritère d'après M. Noiret, qui permet d'opter pour une stratégie préventive ou corrective à appliquer à un équipement.

Dans cet exemple d'outil d'aide à la décision, 9 facteurs de choix adaptés à un environnement industriel donné sont successivement pris en compte pour prédéterminer la criticité relative de chacun des équipements, et le niveau de préventif à leur apporter.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.


ÂGE DU MATÉRIEL
20 15 10 9 8 7 6 5 ans 4 3 2 1 an
INTERDÉPENDANCE DU MATÉRIEL
matériel double (redondance)
matériel indépendant
matériel avec tampon (aval ou amont)
matériel sans tampon
matériel important à marche discontinue
matériel important à marche semi-continue
matériel important à marche continue
COMPLEXITÉ DU MATÉRIEL
peu complexe et accessible
très complexe et accessible
complexe et peu accessible
très complexe et peu accessible
ROBUSTESSE DU MATÉRIEL
matériel de précision, maniement délicat
matériel en surcharge
matériel peu robuste
matériel de précision, robuste
matériel courant
matériel très robuste
COÛT DU MATÉRIEL
très spécial (500 n)
spécial (100 n)
très coûteux (50 n)
coûteux (10 n)
peu coûteux (5 n)
bon marché (n francs)
ORIGINE DU MATÉRIEL
français, grande série
français, petite série
étranger avec SAV
étranger sans SAV
étranger sans logistique

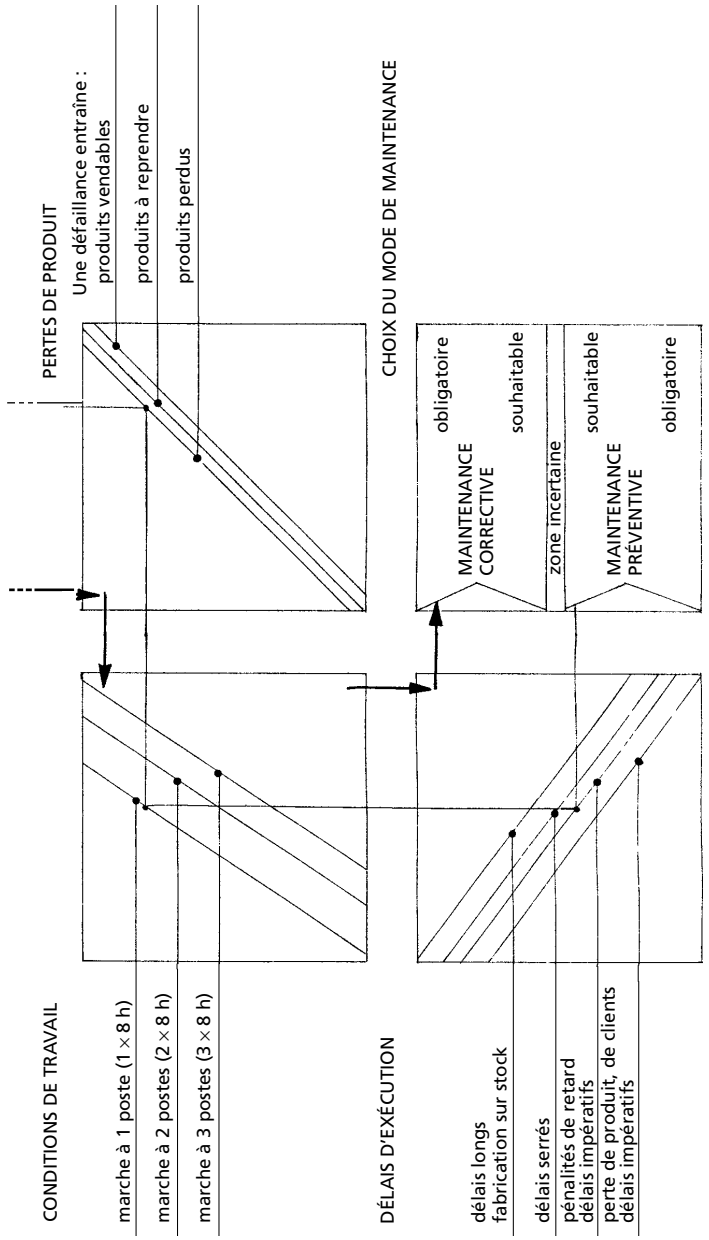


Figure 3.6 – Abaque d'aide à la décision

3.5 Le fichier historique, base du retour d'expérience

3.5.1 Définitions et commentaires

❑ Définitions

Nous nommerons « fichier historique d'un équipement » le recensement chronologique de toutes les défaillances ou des interventions correctives relatives à cet équipement, pendant une période significative. L'historique représente le « carnet de santé » de la machine, depuis sa mise en route ou la date de début de suivi organisé, ou une date de prise de référence jusqu'à la date d'exploitation.

❑ Historique d'interventions et/ou de défaillances ?

Le recensement des défaillances oriente vers une exploitation qualitative des défaillances aux fins d'amélioration par action sur les causes. La localisation, la genèse et les causes d'une défaillance doivent figurer en plus de ses conséquences : paramètres de l'intervention corrective et coûts. Nous verrons au paragraphe 4.1 que les fiches d'analyse de défaillance sont des outils porteurs d'amélioration dont le cumul chronologique constitue le fichier historique des défaillances.

Le recensement des I_c (interventions correctives) oriente vers une exploitation opérationnelle : connaissance des temps passés, des moyens utilisés, des consommations et des coûts. C'est souvent la saisie chronologique des BT (bons de travail) relatifs à un équipement qui constitue le fichier historique des interventions.

Ce fichier historique se prête naturellement à un enregistrement sur GMAO, de par le nombre d'événements à saisir et la facilité d'exploitation ultérieure. L'époque des « cahiers historiques » tenus par le contremaître du secteur et rangés dans son tiroir est révolue.

❑ Doit-on saisir les microdéfaillances ?

□ Influence du poids des microdéfaillances sur la perte de disponibilité

« Plus le niveau d'automatisation, ou plus exactement d'intégration technologique augmente, plus le poids relatif des micro- ou minidéfaillances augmente. » Cette loi se vérifie dès lors que l'on met en place un système de mesure adapté (saisie automatique des arrêts en temps réel). Si l'on nomme T_{Ap} les temps des arrêts propres dus à des défaillances, nous trouverons que le total des durées T_{Ap} (perte de disponibilité) se décompose comme indiqué figure 3.7.

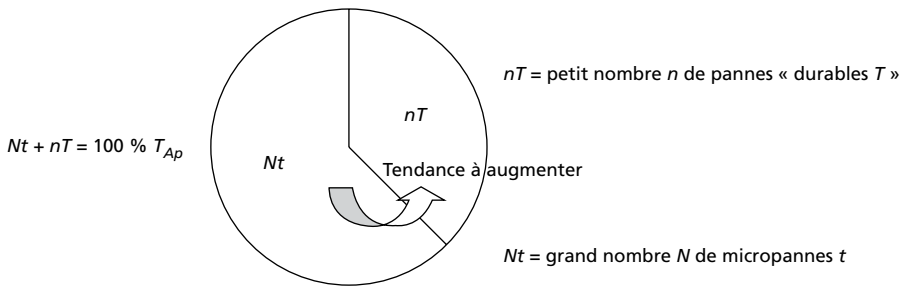


Figure 3.7 – Les microdéfaillances : un gisement de non-productivité… à saisir

Ce graphe illustre l'importance des microdéfaillances, dont la réduction débouche sur des gains importants de disponibilité des équipements, donc de productivité. Mais pour les réduire, il faut les connaître, donc les mesurer, les qualifier et les enregistrer !

Remarquons que, traditionnellement, ces micropannes n'étaient pas saisies : elles existaient, mais elles « s'évaporaient », faussant clairement les indicateurs de disponibilité établis sur la base identifiée des seules pannes durables, bien connues et par nature souvent mémorisées dans la tête des intervenants…

☐ Importance de la saisie des microdéfaillances

Les paramètres relatifs aux microdéfaillances doivent se retrouver dans l'historique, car :

– elles causent parfois des rebuts ;
– elles pénalisent lourdement la disponibilité par leur caractère répétitif;
– elles appartiennent à la routine, donc sont peu visibles et elles apparaissent, prises isolément, négligeables. Ce qui explique qu'on les ait longtemps négligées;
– elles ne « s'arrangent pas toutes seules », donc elles méritent le même soin diagnostic, puis la même recherche d'amélioration que les pannes durables;
– négligées, elles sont souvent à l'origine de pannes plus importantes.

Notons que 5 minutes (négligeables ?) × 6 fois par jour × 5 jours/semaine × 50 semaines = 6 000 minutes, soit 100 heures, ce qui est non négligeable au coût de l'heure de non-production !

La TPM prend ses racines dans ce constat : l'automaintenance a pour avantage premier la prise en charge immédiate de ces micropannes répétitives par les opérateurs. Ceux-ci sont ensuite associés à une réflexion visant à supprimer ou à réduire ces micropannes ou micro-arrêts.

☐ Comment saisir les microdéfaillances ?

Les sorties d'automates et la supervision permettent de mesurer les temps d'arrêt de production. Il est alors intéressant de conditionner le redémarrage de l'équipement à la saisie obligatoire d'une cause d'arrêt. Il suffit de coder les 10 ou 12 causes d'arrêt les plus fréquentes sur le poste de pilotage en ligne pour pouvoir mesurer leur poids relatif sur une période significative. Et sélectionner les événements les plus pénalisants pour les améliorer par réduction ou suppression.

Dans certaines applications, il faudra filtrer les petits micros arrêts s'ils sont trop fréquents et peu significatifs. Il peut être également intéressant de compter certains petits micro-arrêts et d'enclencher une alarme au-delà d'un certain nombre par heure (exemple).

❑ Doit-on saisir les interventions préventives ?

La réponse est NON pour les opérations de maintenance systématique, dont la « trace » se trouve dans le DTE sous forme d'échéancier qui garde la trace de chaque opération réalisée.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

La réponse est OUI pour les interventions conditionnelles qui, par nature, précédent de peu une panne. Elles feront l'objet d'un OTPc (ordre de travail préventif conditionnel) renseigné comme un OTC (correctif). Pour une exploitation fiabiliste de l'historique, la date d'intervention conditionnelle sera traitée comme une date d'intervention corrective.

3.5.2 Constitution d'un historique

❑ Principe et utilité

On n'établit pas un historique parce que c'est à la mode mais parce que c'est un outil incontournable pour connaître les réalités du terrain et le comportement de l'équipement et en déduire la mise en œuvre d'une démarche de progrès.

L'idée de base de la constitution d'un historique est d'avoir une réflexion sur les besoins de la gestion, donc sur la nature des informations de « sortie » de l'historique. Il reste à structurer l'historique à partir des sorties à utiliser, et d'en déduire les « entrées », c'est-à-dire les saisies à y intégrer. Dans cette logique, il faut vérifier que les fichiers historiques d'une GMAO « clé en main » satisfont nos besoins propres.

❑ Nature des informations

□ Exemples d'informations d'entrée

Ces informations sont traditionnellement relevées sur les bons de travail (BT) et les fiches d'analyses de pannes ou lors de comptes rendus en GMAO. Mais elles peuvent aussi être saisies automatiquement à partir d'une supervision. Classées par numéro de BT, ces informations peuvent être :

– des dates (jours et heure et/ou en unités d'usage relevées par compteur),
– l'intitulé sommaire, mais descriptif de l'intervention corrective (module ou organe siège de l'I_c),
– des durées d'intervention,
– des temps d'arrêt de production,
– des imputations qualitatives le plus souvent codées (voir ci-dessous),
– les noms des intervenants,
– les pièces de rechanges utilisées.

□ Exemples d'informations de sortie

Ce sont les mêmes, mais certaines sont traitées. En particulier, il est intéressant de pouvoir « valoriser » une intervention en lui attribuant un coût de défaillance (C_d) à partir des temps d'arrêt (coûts indirects) et des durées d'intervention (coûts directs).

❑ Exemples de codes d'imputation

Afin de faciliter l'exploitation ultérieure de l'historique par un agent des méthodes, il est pratique de coder les interventions suivant les exemples de mises en familles ci-après.

– Exemple : code « cause de défaillance »

0 défaillance imprévisible	5 erreur de conduite
1 cause intrinsèque détectable	6 consignes non respectées
2 cause intrinsèque non détectable	7 défaillance seconde
3 défaut d'entretien	8 déréglage
4 mauvaise intervention antérieure	9 autre cause

– Exemple : code « nature de la défaillance »

Bien que très courante, cette analyse « corporative » est peu porteuse d'améliorations.

1 origine mécanique	4 origine hydraulique, pneumatique
2 origine électrique	5 origine informatique
3 origine électronique	6 origine humaine

– Exemple : code « localisation »

Cette codification sera établie à partir de la décomposition arborescente de l'équipement, au niveau des groupes fonctionnels ou au niveau des « modules sensibles ».

1 moteur	4 capteur
2 transmission	5 régulateur
3 table	6 automate

– Exemple : code « défauts »

Dans ce cas, il est nécessaire de connaître la nature des 10 ou 12 types de défauts répétitifs engendrant des arrêts de production, de façon à imputer chaque arrêt à un « défaut », sans oublier un code « autre cause ». Exemples : colmatage d'un pistolet à colle, déréglage de la navette.

3.5.3 Exploitation d'un fichier historique

❑ Quelques formes d'exploitation

La gestion technique des équipements à partir des historiques de chaque équipement sera faite habituellement au niveau du bureau des méthodes de maintenance, parfois au niveau de la direction du service. Il est évident que les GMAO, ou à défaut des bases de données de type « access », facilitent l'exploitation des informations (assistants graphiques par exemple). L'exploitation peut se faire à trois niveaux :

– analyse d'un parc machine standardisé,

– analyse globale d'un équipement,

– analyse des organes, composants ou modules les plus fragiles.

Il est important de séparer les défaillances « intrinsèques » générées par un fonctionnement normal de l'équipement, des défaillances « extrinsèques » provenant de conduite défectueuse ou d'environnement anormal. Les pistes d'amélioration ne seront pas de même nature !

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ **Exploitation en fiabilité, maintenabilité et disponibilité**

La taille *N* d'un échantillon de défaillances étant à la base de la « confiance » d'une étude fiabiliste, il est important que les saisies de temps soient complètes, véridiques, regroupées (cas de matériels semblables) et étendues sur des périodes significatives. Nous étudierons les « analyses quantitatives de défaillances » par les graphes de Pareto au paragraphe 4.5.

Pour l'estimation de la disponibilité opérationnelle, plusieurs indicateurs sont possibles. Pour exemples :

$$D_{1op} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

$$D_{2op} = \frac{T_O - \sum T_{Ap}}{T_O}$$

avec T_{Ap}, temps d'arrêt propre et T_O, temps d'ouverture ou requis.

Pour estimer D_{1op}, il faudra relever les durées de bon fonctionnement entre dates d'intervention (si $TTR << TBF$) ainsi que les durées d'intervention *TTR*, puis les traiter en moyennes statistiques ou en espérances mathématiques $E(t)$.

Pour estimer D_{2op}, il faudra relever les temps requis T_O (connus en production) et les temps d'arrêt « propres » ou intrinsèques, puis les traiter. Cet exemple prouve bien que c'est la « sortie » de l'historique qui conditionne la nature des saisies.

☐ **Exploitation en « méthodes »**

Il est important que le système d'exploitation de l'historique soit itératif, de façon que les opérateurs qui saisissent les micropannes ou les techniciens qui remplissent les BT « voient le retour », c'est-à-dire les améliorations déduites des saisies. C'est un gage de qualité, car la fiabilité des saisies conditionne la qualité des déductions.

Il appartient à l'agent des méthodes de sélectionner les pannes dangereuses, répétitives ou coûteuses détectées sur une période significative de saisie, de les analyser (voir le groupe d'analyse de pannes, § 10.5.3) puis de proposer des améliorations ciblées portant sur la technique, la logistique ou l'organisation. L'objectif étant d'éliminer les causes de pannes ou, à défaut, de les rendre moins pénalisantes.

L'historique peut également fournir des éléments de gestion des stocks (consommation de rechanges) et d'optimisation du préventif : on ne peut bien prévenir que ce que l'on connaît !

> **Remarque**
>
> Ce système permet de mesurer « en retour d'expérience » l'efficacité des mesures préconisées, par comparaison des indicateurs sur deux périodes « avant » et « après ».

☐ **Exploitation en gestion économique**

Il est intéressant de pouvoir « ventiler » les coûts (ou par défaut les temps) de maintenance ou de défaillance :

– par atelier ou par secteur,
– par type et marque de machine,
– par machine ou par groupe fonctionnel,
– par type d'intervention.

Cela permet la tenue de tableaux de bord comparatifs et de ratios économiques : savoir où nous sommes pour prévoir où l'on va, c'est ce qui permet l'optimisation de la politique de maintenance.

❑ Retours d'expérience

□ Situation du problème

Le vocable « retours d'expérience » recouvre l'exploitation de collectes d'information élargies à plusieurs niveaux d'utilisateurs, suivant le schéma de la figure 3.8.

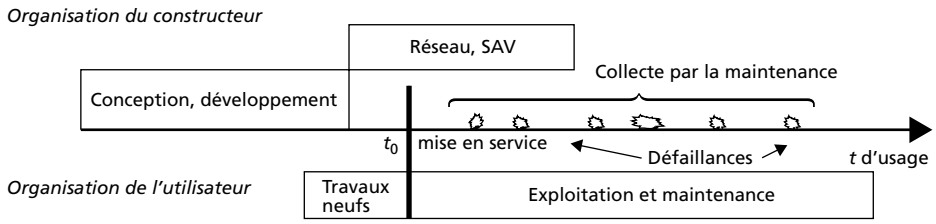


Figure 3.8 – Les destinataires du retour d'expérience

□ Les destinataires potentiels des différents retours d'expérience

Le bureau des méthodes maintenance est exploitant de sa collecte pour lui-même (améliorations techniques et organisationnelles, optimisation du préventif) ou comme relais vers :

– le niveau gestionnaire du service maintenance ;
– les travaux neufs, très concernés par le « rebouclage » de leurs études ;
– le réseau de distribution ou le SAV du constructeur de l'équipement ;
– le bureau d'études du constructeur, s'il est organisé pour un échange partenarial.

À chaque niveau, la potentialité du retour d'expérience est grande pour acquérir la connaissance du comportement et s'inscrire dans une démarche de progrès permanent. Mais la mise en place du retour d'expérience demande une organisation rigoureuse qui dépasse les frontières traditionnelles pour faire place à un partenariat de type client-fournisseur.

□ Les conditions d'une collecte rigoureuse

Certains secteurs ont mis en place depuis longtemps des retours d'expérience très structurés dans une démarche d'assurance qualité. Il en est ainsi de l'aéronautique,

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

du nucléaire, de la chimie, de l'automobile, etc. La crédibilité des informations est souvent sujette à caution, pour les raisons suivantes :

– manque d'harmonisation et de précision dans le vocabulaire utilisé à la saisie ;
– valeurs numériques temporelles suspectes : à quel moment commence l'intervention I_c ? au signalement, au diagnostic ou à l'arrivée du technicien ?
– taille *N* d'échantillon insuffisante pour une exploitation en fiabilité ;
– collecte incomplète (la saisie d'une panne sur trois rend l'estimation de la *MTBF* non significative) ;
– variabilité d'environnement ou de modes de fonctionnement trop grande ;
– hétérogénéité des échantillons : prélevés avec ou sans les défaillances mineures ? avec les seules défaillances intrinsèques, ou extrinsèques, ou les deux ?

4 • LES COMPORTEMENTS PATHOLOGIQUES DU MATÉRIEL

4.1 Les analyses qualitatives de défaillances et leurs enjeux

4.1.1 Comprendre les phénomènes pathologiques : un enjeu stratégique

❑ **Les défaillances : la raison d'être de la maintenance**

Les défaillances sont à la maintenance ce que les pathologies humaines sont à la médecine : leur raison d'exister. Or, toute défaillance est le résultat d'un mécanisme pathologique rationnel et explicable, dû à une ou plusieurs causes à identifier.

– A posteriori, il serait illusoire de vouloir réaliser une intervention corrective, apporter un remède durable ou une amélioration technique à une défaillance non élucidée. La « réparation définitive », opposée au dépannage provisoire, s'appuie sur le diagnostic de la défaillance : c'est une action sur la cause.

– A priori, le seul préventif « vrai » est celui qui se déduit de la compréhension d'une défaillance : on ne peut vraiment prévenir que ce que l'on connaît.

– *Ab initio*, il serait illusoire de vouloir construire des équipements de qualité, c'est-à-dire satisfaisant le besoin des utilisateurs, dans l'ignorance de ce que seront leurs pathologies en fonctionnement dans l'environnement de l'utilisateur. Remarquons que la « sur qualité » ne satisfait pas davantage l'utilisateur que la « sous qualité » !

❑ **Les défaillances : une richesse à exploiter !**

☐ **La maintenance dite proactive**

Ce qui nous amène à l'aspect paradoxal de ce chapitre : la panne est source de richesse ! À condition de s'organiser pour assurer la valorisation d'un événement naturellement négatif (au mauvais moment et au mauvais endroit) en un événement positif : c'est la principale source de progrès en maintenance et en conception.

La compétition (voile, montagne, automobile, etc.) est un bon exemple de génération de progrès à partir des défaillances « terrain » et de l'exploitation du retour d'expérience. Chaque navigateur sait que sa course peut dépendre du fond de filet d'un ridoir : une amorce de rupture, et c'est le mât qui cède… Éric Tabarly, à

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

chaque avarie, grommelait : « ça n'aurait pas dû casser », et il faisait en sorte que ça ne casse plus. L'expérience du terrain vient alors conforter l'innovation technologique et la rigueur du détail vient consolider la fiabilité.

Cette démarche de progrès est parfois nommée la maintenance proactive. Elle est basée sur l'expertise des défaillances passées, sur la compréhension des mécanismes de défaillances pour enrichir les conceptions futures ou, plus modestement, pour éviter la réapparition de cette défaillance.

□ **Construction et amélioration de la sûreté de fonctionnement (disponibilité + sécurité)**

Pour qu'elles deviennent sources de profit, les défaillances peuvent être prises en compte à deux niveaux :

– par les analyses postdéfaillances qui ont pour objectif l'amélioration de la disponibilité d'un équipement en service ;

– par les analyses prévisionnelles qui ont pour objectif la « construction » *ab initio* d'un niveau de sûreté de fonctionnement suffisant, avant même leur fabrication et leur mise en service.

Remarquons que les analyses prévisionnelles reposent sur les connaissances acquises grâce aux analyses postdéfaillances.

4.1.2 Définitions relatives aux défaillances (projet CEN WI 319-003)

❑ **Quelques définitions normalisées utiles**

Défaillance : « cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise ». Après une défaillance, le bien est en panne. Termes proches ou synonymes, mais non normalisés : *failure* en anglais, dysfonctionnement, défaut, faute, panne, avarie, dégradation, anormalité, dommage, erreur, incident, anomalie, arrêt fortuit, détérioration, etc. Merci à l'AFNOR, puis au CEN d'avoir dépassé les usages corporatistes pour proposer une terminologie précisée !

Cause de défaillance : « circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation et à la maintenance qui ont conduit à la défaillance ».

Mécanisme de défaillance : « processus physiques, chimiques ou autres qui conduisent ou ont conduit à une défaillance ».

Mode de défaillance : effet par lequel une défaillance se manifeste.

Panne : « état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures ».

Dégradation : « évolution irréversible des caractéristiques d'un bien liée au temps ou à la durée d'utilisation ».

Une dégradation peut conduire à la défaillance.

État dégradé : « état d'un bien par lequel ce bien continue à accomplir une fonction avec des performances inférieures aux valeurs nominales ou continue à accomplir une partie seulement de ces fonctions requises ».

❑ Typologie des défaillances

La norme AFNOR X 60-011 propose plusieurs mises en famille des défaillances, parmi lesquelles nous retiendrons :

– suivant leur cause (voir § 4.1.2 Les causes intrinsèques et extrinsèques) ;

– suivant leur degré : défaillances partielles ou complètes, permanentes, fugitives ou intermittentes ;

– suivant leur vitesse d'apparition : défaillances soudaines ou progressives.

La défaillance soudaine « […] ne peut pas être anticipée par un examen ou une surveillance préalable » alors que la défaillance progressive peut l'être (critère de détectabilité).

Par combinaison des deux : défaillance catalectique ou par dégradation. La défaillance catalectique est soudaine + complète, alors que la dégradation est progressive + partielle.

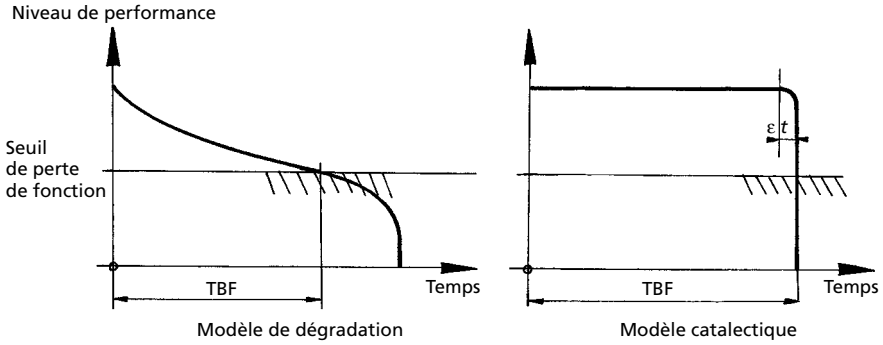


Figure 4.1 – Deux modèles de défaillance

Ajoutons à cette caractérisation les défaillances non détectées, car cachées ou latentes.

Nous distinguerons en fiabilité les défaillances aléatoires, individuelles et de causes indépendantes et les défaillances dépendantes de cause commune ou de mode commun, ou en cascade (l'une provoque l'autre).

❑ Les causes de défaillances

☐ Défaillances de causes intrinsèques ou inhérentes (définitions CEN)

« Intrinsèques » signifie qu'elles sont générées par le système lui-même, en condition normale de fonctionnement. Parmi les causes intrinsèques, la norme CEN distingue :

– « défaillance due à une conception inadéquate du bien » ;

– « défaillance due à une fabrication du bien non conforme à sa conception ou à des procédés de fabrication spécifiés » ;

– « défaillance due à une installation incorrectement réalisée ».

Les défaillances par usure (liées à la durée d'utilisation) et par vieillissement (liées au cours du temps) sont des défaillances intrinsèques.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ **Défaillances de causes extrinsèques (définitions CEN)**

La norme CEN permet de distinguer :

– « défaillance de mauvais emploi, due à l'application de contraintes qui excèdent les capacités spécifiées du bien » ;

– « défaillance par fausse manœuvre, due à une manipulation incorrecte du bien ou un manque de précaution » ;

– « défaillance due à la maintenance, résultant d'une action inadaptée ou exécutée de façon incorrecte » ;

– « défaillance secondaire », conséquence d'une autre défaillance en amont (en cascade).

☐ **Où sont les limites de la défaillance inhérente ?**

Remarquons que beaucoup de défaillances extrinsèques ne sont que des défaillances intrinsèques que l'on a pas su prévoir, souvent par un cahier des charges insuffisamment précis quant à l'environnement de l'équipement et à l'attente du client. Cette attente peut être explicite ou implicite. Si nous reprenons l'exemple de la compétition à voile, il est implicitement « normal » que le gréement étale des vents de force 11 avec des vagues croisées, et il est « normal » que l'électronique embarquée fonctionne avec 100 % d'humidité.

De même, quand 60 % des pannes affectant les matériels biomédicaux (intrinsèquement fiables) sont dues à des mauvaises manipulations, c'est que la prise en compte implicite du facteur humain « à la conception » de ces matériels est insuffisante. Imaginons un distributeur de billets de banque qui « fonctionnerait normalement », au sens de l'automatisme, mais qui ne serait pas blindé, au sens de la sécurité…

☐ **De « l'inhérent au produit » à « l'inhérent au service attendu »**

Les notions de sûreté de fonctionnement (SdF) et de soutien logistique intégré (SLI) trouvent leur place dans cette extension de l'inhérent au système vers l'inhérent à l'environnement du système. Quand une défaillance « normale » pour le constructeur devient inadmissible pour l'utilisateur, alors se pose le problème : qui a la responsabilité de l'adaptation d'un système à un environnement spécifique ? Qui a la responsabilité de satisfaire les besoins implicites, voire potentiels de l'utilisateur ?

Nous pouvons toujours réfléchir aux conditions d'un partenariat concepteur/utilisateur basé sur des intérêts croisés, à l'occasion de contrats de fourniture (cahier des charges, soutien logistique à intégrer), de retours d'expérience et de groupes AMDEC.

D'où la nécessité d'organiser, puis d'exploiter les retours d'expérience de l'utilisateur, témoin de ses insatisfactions.

D'où la nécessité de rédiger un cahier des charges précis avant la fourniture du système, *de façon à réduire la différence entre le produit fourni par le constructeur et le service attendu par l'utilisateur.*

4.1.3 Analyse qualitative postdéfaillance

❑ **Les six éléments de connaissance d'une défaillance**

Une analyse qualitative postdéfaillance doit comporter les six éléments de connaissance permettant de comprendre aussi bien l'environnement du système lors de sa perte de normalité que les mécanismes ayant engendré la défaillance. Cela afin d'apporter des remèdes durables et des mesures d'organisation pour éviter la réapparition de la défaillance, ou pour atténuer ses effets.

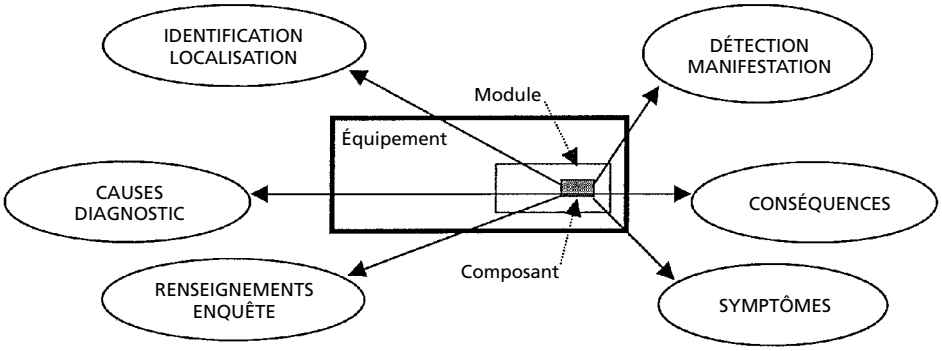


Figure 4.2 – Les critères permettant l'analyse postdéfaillance

❑ **Les six pôles de l'analyse**

1. L'identification et la localisation de la défaillance :

– identification dans l'organisation (numéro de DT, intervenants et nature de la panne) ;
– situation dans le temps (relevé compteur et date + heure) ;
– localisation dans l'espace à travers l'arborescence (localisation par code de l'équipement, puis du module ou du composant défaillant) ;
– identification fonctionnelle : quelle est la fonction perdue ?

2. La détection, la manifestation et l'alarme :

– par qui, quand et par quel moyen la défaillance a-t-elle été détectée ?
– dans quelles conditions de surveillance et/ou par quels capteurs en place ?
– manifestation de la défaillance : amplitude (partielle ou complète), vitesse (progressive ou soudaine), caractère (permanent, fugitif, intermittent).

3. Les renseignements recueillis par une enquête préliminaire :

– DTE relatif au composant défectueux localisé ;
– origine et référence du composant localisé ;
– état de l'environnement avant et au moment de la détection, conditions de service et circonstances ;
– fichier historique (quelles sont les interventions antérieures ?).

4. Les symptômes :

– observés *in situ* avant l'arrêt : relevé des « anormalités » (bruit et vibrations, couleur, odeur, chaleur, etc.), indications mesurées ou captées, caractérisation des contraintes, perturbations en sortie, défauts de qualité associés ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– observés après dépose ou démontage : mesures statiques, mesures électriques en tension ou hors tension, examen morphologique en cas de rupture mécanique, examen de surface, photographie ou dessin ;
– observés par examens complémentaires : microscopie, analyses chimiques, contrôles non destructifs ou destructifs, essais, etc.

5. Les conséquences :

– sur le plan de la sécurité, de l'indisponibilité, de la non-qualité-produit, des coûts directs, etc. ;
– mineures, majeures ou critiques.

> **Remarque**
>
> Chronologiquement, l'évaluation « à chaud » des conséquences d'une défaillance précède l'analyse « à froid » postdéfaillance.

6. Les causes :

– imputation extrinsèque : accident, choc, surcharge, mauvaise utilisation, erreur de conduite, non respect de consigne, défaut d'entretien, manque de précaution, environnement non conforme, défaillance seconde, ou en cascade ;
– imputation intrinsèque : défaut de santé-matière, de conception, de fabrication, de montage, d'installation, mode de défaillance en fonctionnement : usure, abrasion, corrosion, fatigue, détérioration de surface, déformation, rupture, vieillissement, etc.

❑ Les fiches d'analyses qualitatives de défaillances

Le recueil de ces informations après défaillance doit se faire sur une fiche d'analyse de défaillance. Elle sera structurée à partir des six pôles étudiés, et adaptée à la logique documentaire de l'entreprise. L'organisation du recueil est de la responsabilité de l'agent des méthodes du secteur concerné. La compilation de ces fiches engendre une base de données qualitative complémentaire des données quantitatives. Leur exploitation sera étudiée au paragraphe suivant.

Notons que le GAP (groupe d'analyse de pannes) a vocation à établir et à exploiter ces fiches dans une logique de TPM décrite au paragraphe 10.5.

❑ Dans quel cas faut-il analyser une défaillance ?

Certainement pas en temps réel et pour chaque défaillance ! Mais en temps différé, après sélection de pannes répétitives ou coûteuses par l'agent des méthodes. Cette hiérarchisation des défaillances peut se faire à partir d'une analyse quantitative de défaillances suivant les graphes de Pareto (voir § 4.4.2) ou suivant une AMDEC qui s'appuie généralement sur trois critères (voir § 4.5.3) :

– la probabilité d'occurrence,
– la gravité de ses effets,
– la non-détectabilité.

Nous en déduirons un indice de criticité montrant la hiérarchie des pannes à élucider en profondeur.

Remarque

Pour effectuer un dépannage, par nature rapide et provisoire, il suffit le plus souvent d'effectuer la localisation du composant défectueux et de le remplacer. Ce que beaucoup de techniciens nomment à tort « réaliser un diagnostic ». Le diagnostic comporte (par définition du CEN) outre la détection et la localisation, l'identification de la cause. Elle seule permet une réparation définitive par action sur la cause, donc prévention de la réapparition.

4.1.4 Genèse des défaillances

❑ **Maintenance proactive : expertise et diagnostic**

Les défaillances sont des événements caractérisés par des phénomènes pathologiques qui débouchent, pour un équipement, sur un état : la panne.

□ **Diagnostic**

Par définition « recherche de la cause », le diagnostic est l'action cérébrale identique à une « enquête » qui permet, à partir de l'observation de symptômes, de rechercher les causes d'une défaillance, intrinsèques ou extrinsèques, ou les deux conjuguées.

□ **Expertise**

L'expertise est une démarche plus approfondie qui permet de comprendre les mécanismes d'une défaillance intrinsèque, c'est-à-dire les processus chimiques, physiques, métallurgiques ou autres, qui sont en amont de l'arbre des causes. Ce que J. Maxer appelait la « cause première », avec pour enjeu la prévention de ces processus, donc la suppression *ab initio* des défaillances.

L'expertise suppose la mise en œuvre de moyens d'investigation qui peuvent être lourds, donc centralisés dans des laboratoires spécialisés (CETIM pour la métallurgie, LCE pour l'électronique, laboratoires intégrés pour certains groupes industriels tels que EDF), associée à des compétences approfondies sur le champ des « phénomènes pathologiques ».

❑ **Du bon fonctionnement à la défaillance**

Nous nommerons φ_0 l'ensemble des phénomènes permettant la réalisation d'une fonction *f*, c'est-à-dire le « comment ça marche ». Nous nommerons φ_1 le ou les phénomènes pathologiques expliquant la perte de cette même fonction *f*.

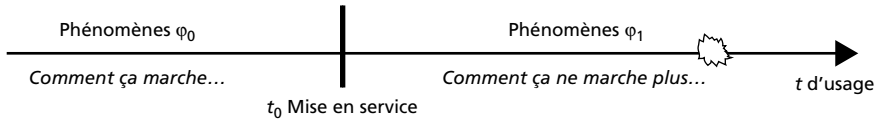


Figure 4.3

□ **Les phénomènes φ_0 ou comment ça marche…**

Ce sont les lois comportementales associées aux disciplines traditionnellement enseignées dans une optique de compréhension et de conception des systèmes. Les

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

connaissances techniques acquises lors de l'apprentissage initial, sous forme de disciplines telles que la mécanique sous ses différents aspects, l'électronique, l'électrotechnique, l'hydraulique, l'automatisme, etc., permettent de construire des systèmes qui, à t_0, auront un bon fonctionnement. Rappelons l'hypothèse de la maintenance : le système fonctionne à l'origine, ce qui s'écrit en fiabilité $R(t_o) = 1$.

Mais les concepteurs ne sont pas toujours formés à la fiabilité associée à leur choix technologique. Bien des concepteurs électroniciens n'ont jamais entendu parler des techniques de déverminage chargées de « couvrir » les défaillances juvéniles des composants et des cartes électroniques. Bien des mécaniciens concepteurs sous-estiment l'influence des coefficients de concentration de contrainte sur la tenue en service d'un arbre de transmission.

L'application des lois φ_0 permet la construction, puis la fabrication d'équipements qui seront vendus et utilisés, mais dont le bon fonctionnement initial sera vite altéré lorsqu'il sera confronté à la réalité du terrain. En effet, ces lois reposent souvent sur des modélisations et des hypothèses, telles que l'homogénéité et l'isotropie, qui ne sont pas vérifiées dans le réel. Prenons un exemple mécanique élémentaire : la modélisation d'un point matériel comme centre instantané de rotation. Ainsi, sur la figure 4.4, la pression en A est $P_A = F/S$; si $S \to 0$ alors $P_A \to \infty$, contrainte qu'aucun matériau ne pourrait supporter. Cet exemple montre qu'il est nécessaire d'aborder les contraintes hertziennes et leur distribution pour pouvoir expliquer les dégradations inhérentes à la fatigue d'un roulement. Et de connaître la structure d'une surface de contact pour pouvoir maîtriser le choix des matériaux et des traitements susceptibles d'éviter le mécanisme de dégradation par écaillage (voir § 2.3.5).

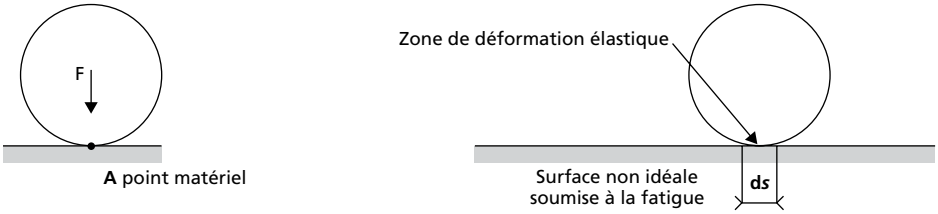


Figure 4.4 – De l'insuffisance de modèles trop élémentaires pour expliquer le réel

☐ **Les phénomènes φ_1 ou comment ça ne marche plus…**

Il s'agit des mécanismes de défaillance considérés comme des phénomènes pathologiques générant une perte de normalité ou un facteur d'instabilité. Leur élucidation requiert une expertise, base de la maintenance dite proactive, s'appuyant sur des compétences nouvelles généralement externes : physiciens, métallurgistes, chimistes, thermiciens, hydrauliciens, etc. Considérons une dégradation suivant le modèle représenté par la figure 4.5.

Les deux scenarii illustrent l'intérêt qu'il y a à démystifier les mécanismes de défaillance.

Dans le premier cas, l'intervention corrective I_{c1} consiste en un dépannage sans élucider le phénomène ayant généré la perte de normalité. C'est en panne, je

dépanne ; c'est déréglé, je règle. Que va-t-il se passer ensuite ? Les mêmes causes ayant une fâcheuse tendance à produire les mêmes effets, je risque d'avoir à recommencer prochainement !

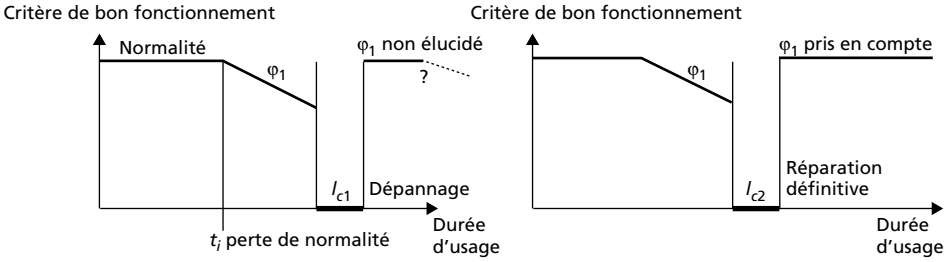


Figure 4.5 – De la panne effacée à la panne résolue

Dans le second cas, l'intervention I_{c2} prend en compte le phénomène φ_1. Il faut évidemment s'en donner les moyens : état d'esprit + compétence. Mais le recours à l'expertise « scientifique » externe ou interne n'est pas toujours nécessaire, et du bon sens suffit souvent à progresser.

Prenons l'exemple simple d'un joint d'étanchéité de carter d'huile « fuyard ». Après l'avoir changé *n* fois, on peut se préparer à le changer pour la $n + 1$ fois, sauf si l'on a compris l'incompatibilité du matériau du joint avec l'huile ! Sans être expert en chimie organique, il sera aisé de trouver un matériau compatible, et nous n'entendrons plus jamais parler de ce joint.

Les deux graphes précédents paraissent semblables : et pourtant, quelle différence dans la progressive maîtrise du comportement d'un équipement !

Remarque

Nous découvrons ici un élément de base du kaizen japonais (voir § 9.2.4), constitué par une stratégie de « petits pas » vers l'amélioration. Le dépannage ne dégage aucune valeur ajoutée. Seule une action d'amélioration en temps différé assure de la valeur ajoutée : c'est l'essence même de la maintenance.

□ φ_0 et φ_1 sont des phénomènes de nature différente

Un décalage existe souvent entre les modes de fonctionnement et les mécanismes de défaillance, qui rend vain le corporatisme et justifie la nécessaire polyvalence des techniciens.

Ainsi une corrosion d'acier, déterminé par un mécanicien, implique une compétence en électrochimie pour être comprise, donc pour être prévenue. À l'exemple d'une mèche de gouvernail soumise à un couple galvanique et protégée par une anode en zinc.

Ainsi un roulement à billes peut être dégradé par des « crevasses » dues à un courant de fuite.

Ainsi un défaut de connectique (discontinuité électrique) peut avoir une origine mécanique. Nous avons eu à étudier des rapports d'intervention éloquents à ce sujet : dans un atelier, une même intervention était codée 4 (mécanique) ou 2 (électrique).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Il s'agissait du desserrage d'une borne. Logiquement, l'électricien y voyait une panne électrique, le courant ne passant plus. Tout aussi logiquement, le mécanicien y voyait une défaillance mécanique par desserrage d'un écrou.

Les formations initiales en maintenance n'étudient en général que les phénomènes φ_0. Il serait certainement utile aux techniciens de compléter leur expérience de terrain par des formations complémentaires en « pathologie φ_1 » de façon à pouvoir mieux diagnostiquer les défaillances.

❑ Constitution d'une expertise

1. Renseignements préliminaires

Toute expertise comprend une enquête préliminaire de terrain destinée à rassembler tous les éléments de connaissance utiles, à l'identique de l'analyse qualitative vue au paragraphe 4.1.3. Elle analysera les conditions de fonctionnement, nominales et réelles.

2. Observations et examens

L'expertise comprendra ensuite toutes les observations visuelles ou instrumentales des zones suspectes et des faits avérés. Souvent, des examens complémentaires de laboratoires seront nécessaires, par exemple pour la vérification de la nature des matériaux et de leur traitement.

3. Diagnostic

Seront alors incriminées les causes :

– se rapportant à la conception (choix des matériaux) ou la fabrication de la pièce (processus, contrôle) ;

– se rapportant aux conditions d'utilisation et à leur conformité.

4. Propositions de remèdes

L'expertise volontaire n'ayant pas pour objet de trouver des coupables, mais des solutions, des propositions seront alors émises pour prévenir le renouvellement de cette défaillance. Lorsque les éléments incriminés sont standardisés, il est possible d'étendre ces propositions à la surveillance des éléments semblables non encore défaillants. Nous passons alors de la défaillance « guérie » (le correctif) aux défaillances prévenues (le préventif).

❑ À quel niveau peut-on exploiter une expertise ?

Toutes les expertises ne requérant pas un niveau scientifique extrême, il est envisageable et hautement profitable de réaliser de l'*auto-expertise* par moyen propre, ou avec l'aide ponctuelle d'un spécialiste. Seules de rares pannes majeures seront confiées à des laboratoires d'expertises, dans un cadre volontaire ou parfois « forcé » : cas de la défaillance entraînant des suites juridiques par un litige commercial ou par un accident corporel. Ces expertises de défaillance pourront être exploitées à deux niveaux :

– en interne, au bureau des méthodes pour apporter des améliorations évitant la réapparition de la défaillance expertisée et pour capitaliser l'expérience, ou au bureau d'études-travaux neufs pour apporter des améliorations lourdes et pour enrichir les prochains cahiers des charges. Le recours à des experts externes est

évidemment envisageable pour approfondir ou conforter le diagnostic et lui associer les remèdes les mieux adaptés ;

– en externe, si l'on est capable de nouer des liens de partenariat avec le fournisseur de l'équipement concerné et s'il possède une structure d'exploitation de retours d'expérience.

Illustrons la situation temporelle des expertises et de leur exploitation (figure 4.6) :

– en interne, l'auto-expertise est un facteur d'amélioration. On ne sait prévenir efficacement que ce que l'on a compris. C'est l'aspect le plus valorisant du bureau des méthodes ;

– en externe, l'auto-expertise répercutée par les « travaux neufs » peut intégrer et enrichir une base de données constructeur, au bénéfice des utilisateurs ultérieurs.

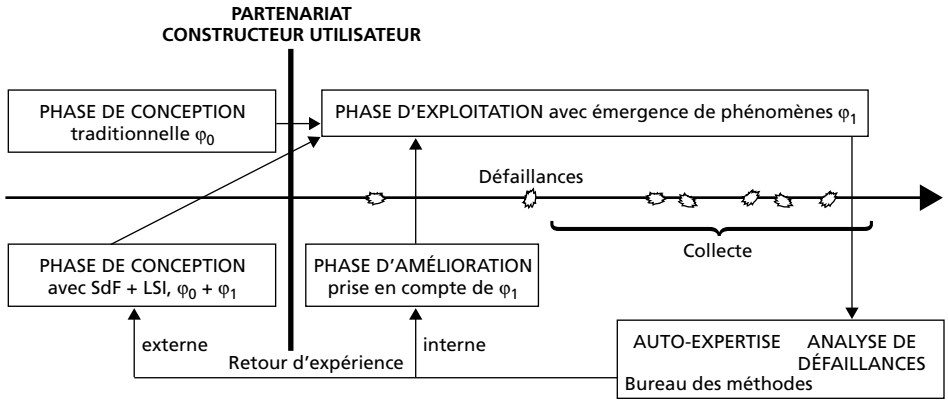


Figure 4.6 – Organisation du retour d'expérience après analyse de défaillance et/ou expertise

❑ **Conclusion**

Nous conclurons ce paragraphe sur le potentiel de richesse contenu dans l'émergence de défaillances, à condition de s'organiser pour passer de la panne « tant pis » à la panne « tant mieux » ! Ce que Imai exprime sous la forme des « *welcome problems* ».

La maintenance proactive, par opposition à la maintenance réactive, implique l'analyse et l'expertise des défaillances : c'est la principale source réaliste d'amélioration et de prévention en maintenance.

4.2 Quelques mécanismes de défaillance à connaître

4.2.1 Introduction

Nous avons vu à quel point l'expertise postdéfaillance est génératrice de progrès et combien la confrontation de la prévision théorique avec les réalités du terrain peut devenir fructueuse si l'on exploite les retours d'expérience. Notre propos n'est pas d'établir une liste exhaustive de tous les modes de défaillances relative à toutes les

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

technologies. Citons quelques ouvrages spécialisés en expertises : (CET 93), (CET 96), (MOU 90) (voir Bibliographie en fin d'ouvrage), et tous les ouvrages relatifs aux matériaux et à la tribologie. Mais il est utile de démystifier les mécanismes de défaillance les plus fréquents dans nos ateliers, au niveau des parties opératives (majorité d'organes mécaniques) et des parties commande (automatismes faits de composants électriques, électromécaniques et électroniques).

Il est essentiel de sensibiliser les techniciens de maintenance au fait qu'une défaillance n'est jamais une fatalité, mais le fruit d'un mécanisme rationnel et explicable.

4.2.2 Modes de défaillance mécanique

❑ Mécanismes d'évolution des défaillances mécaniques

□ Notions de cristallographie et les défauts de « santé-matière »

Avant de comprendre comment un matériau peut perdre sa cohésion, il faut connaître sa « normalité » initiale, qui repose sur une structure cristallographique organisée en réseau spacial souvent cubique (Fe, Cr, Cu, Al…).

Ces cristaux sont composés de mailles identiques entre elles et caractéristiques de la nature du métal ou de l'alliage. Chaque point du réseau occupé par un atome constitue un nœud.

Exemple

Maille cubique à corps centré (fer α, chrome, vanadium).

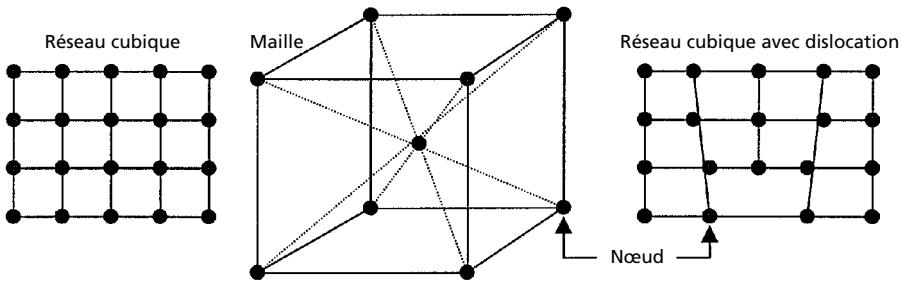


Figure 4.7 – Structures cristallographiques des métaux et des alliages

Les faces des mailles forment des plans réticulaires, séparés par la distance interréticulaire. Cet arrangement régulier est souvent perturbé par des défauts ponctuels ou linéaires, illustré par le schéma du réseau disloqué (figure 4.7). Autour de cette zone, le positionnement des atomes est perturbé, caractérisant un défaut-matière inhérent au mode d'obtention du matériau ou une déformation permanente sous contrainte. Ce défaut est « l'incubation » d'un processus ultérieur de dégradation. De plus, si la matière n'est jamais idéale à cœur (inclusions et impuretés sous forme d'oxydes, de silicates ou de sulfures), elle l'est encore moins en surface (couches d'oxydes). Notons que si ces défauts représentent des défaillances potentielles, tous n'évolueront pas en défaillance avérée.

☐ Processus évolutif

Dans le cas d'une défaillance mécanique sous contrainte (fatigue par exemple), les quatre phases successives sont les suivantes : *incubation, initiation, propagation, rupture.*

1. L'incubation est le stade initial, objet de défauts par dislocations qui concernent la microstructure du matériau, éventuellement observables au microscope électronique.

2. L'initiation, ou l'amorçage, consiste dans l'apparition de microfissures dont la croissance est liée aux plans de glissement cristallographiques. Des contrôles non-destructifs sur les zones suspectes sont envisageables.

3. La propagation se fait à partir d'une ou deux des microfissures précédentes. Elle se fait suivant un plan normal à l'axe des sollicitations. Des signes apparaissent (strictions, fissures débouchantes, etc.) rendant possibles la maintenance conditionnelle.

4. Le phénomène s'accélère brutalement lorsque la fissure a atteint une taille critique : l'arrachement final se caractérise par des « gros grains » faciles à observer sur un faciès de rupture.

Les défauts relatifs à la « santé-matière » précèdent et initient les défaillances en fonctionnement.

Exemples

Défauts initiés lors de l'élaboration de la matière : retassure de cubilot (fonte), tensions internes de laminage, etc.
Défauts initiés lors de la fabrication d'une pièce : écrouissage d'usinage, surchauffe de soudure, tapure de traitement thermique, etc.
Défauts initiés lors du montage : couple de serrage exagéré, choc sur un roulement, etc.

❑ Défaillances mécaniques par détérioration de surfaces : fatigue et usure

☐ Différentes formes de détérioration de surfaces fonctionnelles

– L'usure est l'enlèvement progressif de matière à la surface des pièces d'un couple cinématique en glissement relatif.
– Le *fretting-corrosion*, ou usure par microdébattements, est une usure particulière apparaissant au contact de deux pièces statiques, mais soumises à de petits mouvements oscillants (vibrations, par exemple). C'est le cas de pièces frettées, des clavetages ou de roulements longuement à l'arrêt.
– L'écaillage est l'enlèvement d'assez grosses « écailles » de matière par fatigue de contact.
– Le grippage est la soudure de larges zones de surface de contact, avec arrachement massif de matière.
– L'abrasion est l'action d'impuretés ou de déchets (poussières, sable, particules métalliques émises).
– La cavitation est due à l'implosion de microbulles de gaz incondensables sous l'action d'une brutale chute de pression (accélération de la vitesse d'écoulement en régime turbulent) au sein d'un liquide. L'onde de choc génère du bruit et des « cratères » dans la zone de cavitation (sur hélices, rouets de pompes, etc.).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– L'érosion est l'enlèvement de matière par l'impact d'un fluide ou de particules solides en suspension, ou de phénomènes électriques (arcs).
– Le faïençage est un réseau de craquelures superficielles dû à la fatigue thermique.
– Le marquage est un enfoncement localisé dû à une charge ponctuelle.
– Le rayage est la trace laissée par le passage d'un corps dur.
– Les corrosions seront étudiées au paragraphe § 4.2.3.

Nous limiterons notre approche de la tribologie aux deux phénomènes φ_0 les plus fréquents en fonctionnement : le roulement (contacts ponctuels ou linéique) et le frottement (contact surfacique) auxquels correspondent les deux mécanismes de dégradation φ_1 : la fatigue de contact (écaillage) et l'usure.

☐ Roulement et fatigue de contact

Les roulements à billes, à aiguilles ou à rouleaux se détériorent intrinsèquement (sous conditions idéales de montage, d'utilisation et de lubrification) par fatigue de contact, en application de la théorie de Hertz.

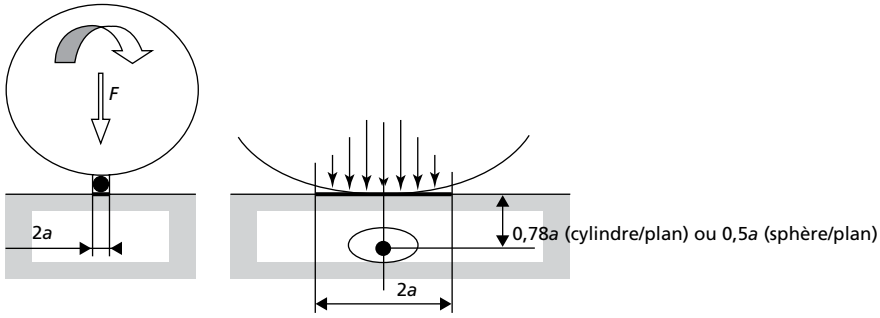


Figure 4.8 – Répartition des contraintes hertziennes (exemple d'un roulement cylindre/plan)

Prenons le cas d'un contact cylindre/plan : sous une charge F perpendiculaire, l'aire de contact a une largeur $2a$. La contrainte de cisaillement sera maximale, sur le chemin de roulement, à une profondeur de $0{,}78a$ déterminée par le tricercle de Mohr. C'est à partir de cette zone que peuvent apparaître des fissures parallèles à la surface, puis débouchantes (piqûres). L'évolution se fera en libérant des « écailles », comme illustré au paragraphe 2.3.5, entraînant une dégradation rapide du chemin de roulement.

☐ Frottement et usure

Ce mode de défaillance est inexorable dès que deux surfaces en contact (couple tribologique) ont un mouvement relatif (plan/plan ou cylindre/cylindre). La tribologie est la science expérimentale qui étudie ces phénomènes.

Mécanisme de l'usure

La théorie de Tabor et Bowden des microsoudures donne une explication compatible avec la réalité constatée, l'adhérence ou le frottement. Elle repose sur le fait

que la surface théorique de contact se limite en fait à de petites aires de contact entre les aspérités plastiquement déformées de chaque surface. Les pressions de contact entre aspérités et la chaleur dissipée créent des microsoudures instantanées constituées d'un composé dépendant de la nature des matériaux en contact. La force « de frottement » est la résultante des efforts de cisaillement qui rompent toutes ces liaisons avec transfert ou libération des particules du composé formé.

Dynamique de l'usure : allure des lois de dégradation

L'usure se paramètre de deux façons : soit par u = épaisseur usée, soit par V_u = volume de matière enlevée (figure 4.9).

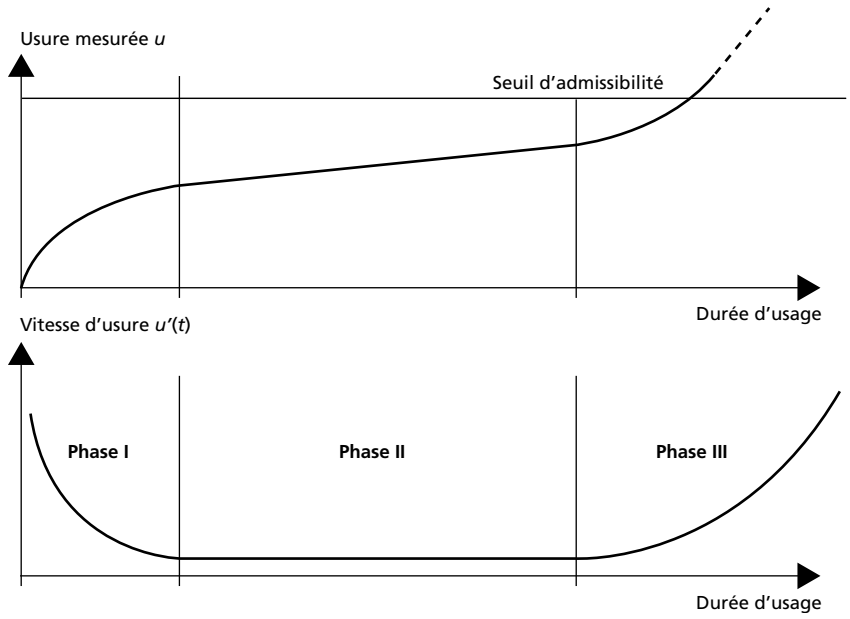


Figure 4.9 – « Loi d'usure » : le mécanisme de dégradation par usure

À partir de deux surfaces initiales « finies » (au sens du mode d'obtention) :

– la phase I est constituée de l'abrasion des principales aspérités : c'est la période de « rodage » affectant les ondulations macrogéométriques et la rugosité liée au mode d'obtention ;
– la phase II est constituée de « l'usure stable » linéaire dans le temps, avec transfert des composés : l'usure est reportée principalement sur l'une des surfaces de contact. Notons que la vitesse d'usure $V_u(t)$ est proportionnelle au produit $p \cdot V_g$, pression de contact apparente par la vitesse de glissement ;
– la phase III, dite « usure catastrophique » consiste en émissions particulaires, ces débris d'usure créant un « labourage » de la surface la plus tendre et une dégradation rapide.

Remarquons que les analyses de lubrifiants mettent en évidence cette succession de phases en caractérisant le nombre et la taille croissante des particules métalliques libérées.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Le concepteur et le technicien de maintenance face à la prévention de l'usure

L'étude simplifiée précédente du mécanisme de l'usure a pour objet de mettre en évidence quelques points clés qui concernent le concepteur et le responsable de maintenance :

- l'importance du choix des matériaux (coefficient de frottement *f* du couple tribologique). Rappelons que suivant les applications, trois types de problèmes sont à résoudre :
  - frottement et usure minimaux dans les paliers, les glissières, les engrenages, les cames, etc. ;
  - frottement maximal et usure minimale pour les freins, les embrayages, les pneumatiques et semelles, etc. ;
  - frottement et usure maximaux pour les meules et les limes ;
- l'importance des éléments de maintenabilité : « report » d'usure sur la pièce voulue, bagues et plaques d'usure interchangeables, détection des seuils d'usure, etc. ;
- l'importance du mode d'obtention des pièces (la rectification augmente l'écrouissage des sous-couches, par exemple), de leurs traitements thermiques, de leurs traitements de surface (cémentation, nitruration) ou de leurs revêtements de surface (PTFE, céramique, oxydes métalliques) ;
- l'importance des éléments de la lubrification :
  - du type de lubrification (limite, hydrodynamique ou mixte) ;
  - de la nature du lubrifiant (huile, graisse ou lubrifiant solide, index de viscosité et additifs) ;
  - de son organisation (surveillance des niveaux, de la qualité, fréquence des vidanges) ;
  - du suivi par analyse des particules émises (nature, quantité et dimensions) et la détermination des seuils de pollution en maintenance conditionnelle ;
- l'importance de l'expertise, c'est-à-dire de la compréhension des mécanismes de dégradation observés en exploitation industrielle, pour trouver des solutions amélioratives : l'usure ne se supprime pas, mais de nombreuses solutions techniques existent pour la réduire *in situ* (maintenance) ou mieux, pour la maîtriser *ab initio* (concepteur).

❑ Défaillances mécaniques par déformation plastique

□ Les différentes déformations

L'essai de traction met en évidence, suivant la sollicitation appliquée à l'éprouvette, une zone de déformation élastique et réversible, puis plastique et non réversible.

La déformation élastique sous contrainte de fonctionnement n'est pas une défaillance en soi, de par sa réversibilité sauf cas d'application particuliers : un allongement peut créer une perte d'étanchéité, un arbre long soumis à des effets centrifuges peut se déformer et entraîner un « balourd » aux conséquences néfastes au bon fonctionnement.

Par contre, les déformations plastiques permanentes sont des défaillances en elles-mêmes, puisque irréversibles. De plus, elles contiennent un risque de rupture ultérieure de nature catalectique, donc dangereux.

□ **Déformation plastique sous contrainte mécanique**

Ces déformations dues à un dépassement de la limite élastique R_e (choc, surcharge) peuvent être locales (marquage, empreintes sur engrenage) ou étendues à un profil ou une section. Une inspection à ce stade d'apparition d'une striction (zone de diminution de la section) peut prévenir le risque d'une prochaine rupture.

□ **Déformation plastique sous contrainte thermique et dans le temps : fluage et relaxation**

Le fluage est une déformation apparaissant sous contrainte mécanique associée à une température de service supérieure à 0,4 T_f (température de fusion), soit à partir de 450 °C pour les aciers. La vitesse de fluage peut être rapide (contrainte forte à température faible) ou lente (contrainte faible sous forte température).

La relaxation est un détensionnement, par diminution lente de contrainte, post-fluage, post-traitement thermique ou post-soudage.

❑ **Défaillances mécaniques par ruptures ductiles, fragiles ou de fatigue**

Les ruptures sont des phases finales d'évolution, de nature catalectique. Nommées « défaillances structurelles », la maintenance doit les prévenir en phase de propagation. L'observation des faciès de rupture est un élément intéressant pour la compréhension du mécanisme de défaillance, donc pour le diagnostic et l'expertise.

□ **Rupture ductile**

Elle survient après une phase de déformation plastique appréciable, allongement du matériau et striction au niveau de la rupture. Une inclusion est souvent à l'initiation de la défaillance.

□ **Rupture fragile**

Par opposition à la précédente, la rupture fragile survient après une très faible déformation plastique. Elle est souvent l'effet d'une surcontrainte brutale ou d'un choc, et elle est favorisée par un effet d'entaille ou par la fragilité intrinsèque du matériau. À l'échelle microscopique, la déchirure fragile peut être transcristalline (par décohésion suivant des plans de clivage perpendiculaires aux plans réticulaires) ou intercristalline (plans de clivage parallèles aux plans réticulaires).

La rupture « semi-fragile » est de même nature, mais concerne des pièces de grandes dimensions (réservoirs sous pression, par exemple). Le caractère instantané de la décohésion de la matière la rend dangereuse.

□ **Rupture par fatigue**

La courbe de Wöhler illustre les phénomènes de fatigue sous différentes contraintes (figure 4.10).

La courbe de Wöhler montre que la rupture d'une pièce peut se produire :

– par fatigue oligocyclique (ou plastique) en zone I si la contrainte est supérieure à la limite élastique *Re* et qu'elle est appliquée un nombre limité de cycles;

– par limite d'endurance en zone II, sous une sollicitation inférieure à sa limite élastique, si cette sollicitation est répétée un certain nombre de cycles.

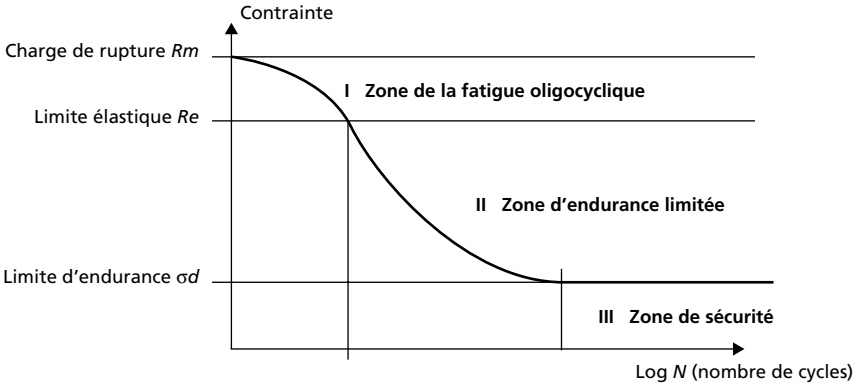


Figure 4.10 – Les trois zones de la courbe de Wöhler

Par contre, elle montre l'existence d'un niveau de contrainte appelé limite d'endurance (σd), en deçà duquel peut être appliqué un nombre illimité de cycles (en zone III dite de sécurité).

Parmi les facteurs favorisant la rupture par fatigue, notons le fretting-corrosion, l'oxydation en phase de fissuration, et surtout l'impact des « effets d'entaille » (concentrations de contraintes) liés au dessin de la pièce.

□ **Exemple d'une rupture d'arbre par fatigue oligocyclique : de l'intérêt d'une expertise…**

Dessin d'origine de transmission et situation du plan de rupture

Soit le cas très fréquent d'un arbre de transmission soumis à une flexion rotative associée à une torsion (figure 4.11).

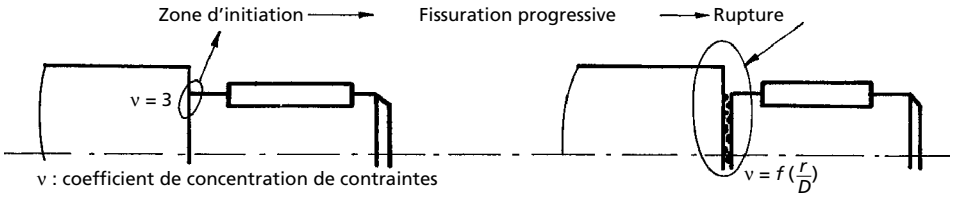


Figure 4.11 – Rupture d'un arbre de transmission par fatigue

L'initiation de la défaillance provient d'un défaut de conception classique : le concepteur a dessiné un épaulement vif en négligeant de calculer le diamètre avec la prise en compte du coefficient de concentration de contrainte. De plus, l'usinage de l'épaulement est peu soigné entre le dressage et le chariotage, d'où l'amorce de

rupture. La propagation s'est faite par fissuration progressive non détectée. La rupture par fatigue en service fut soudaine, entraînant la perte de transmission du couple.

Action corrective de routine

Dans beaucoup d'ateliers, l'usage amènera soit à consommer un arbre de rechange identique au précédent, soit à reprendre le dessin initial pour refaire la pièce à l'identique, pour le même effet dans une semaine ou dans un an ! C'est l'illustration de la négation de « l'état d'esprit maintenance » !

Action corrective avec amélioration : la richesse de l'expertise !

Une fois les causes de la rupture déterminées (auto-expertise envisageable), il devient facile de redessiner cet arbre, en précisant le soin à apporter à l'usinage de la gorge de réduction des concentrations de contraintes, en modifiant éventuellement la nuance de l'acier ou les paramètres du traitement thermique. Pour une bonne maîtrise de la fiabilité ultérieure de cet arbre, modifié suivant la figure 4.12.

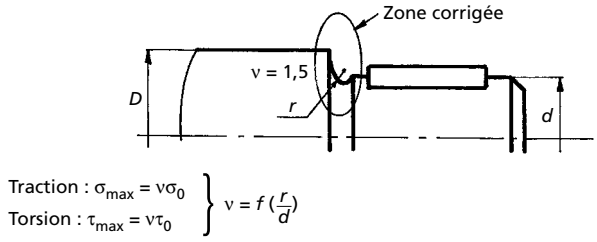


Figure 4.12 – Amélioration de la conception

Remarque

Quel est le surcoût de l'amélioration associée à une possible auto-expertise ? C'est plus le coût de la compétence au service d'une bonne motivation qu'un surcoût matériel, faible dans ce cas comme dans beaucoup d'autres.
Quel sera le gain associé à la prévention de cette défaillance et à l'anticipation de défaillances semblables ? Fort, si la rupture intempestive d'un arbre de transmission perturbe la production, ce qui est probable. Très fort si l'on généralise cette réflexion à d'autres défaillances traitées par la routine du dépannage.

4.2.3 Modes de défaillance par corrosion

Tous les responsables de maintenance sont confrontés aux multiples formes de corrosions aux contacts des métaux et de leur milieu ambiant : air atmosphérique, eau plus ou moins chargée, liquides et gaz divers. Le mécanisme de base est la corrosion électrochimique. Mais bien d'autres formes existent, que nous allons présenter brièvement : pour les prévenir, mieux vaut connaître leur existence !

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Corrosion électrochimique

□ Mécanisme de la corrosion en phase aqueuse

Les surfaces métalliques exposées à un milieu aqueux sont soumises à une oxydation du métal avec libération d'électrons. Dans le cas du fer, la réaction anodique s'écrit :

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$$

Les électrons libérés sont captés par la réaction de réduction et les ions ferreux sont en solution dans l'eau. La réaction cathodique est :

$$2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2$$

La dissolution se propage suivant une loi linéaire dans le temps.

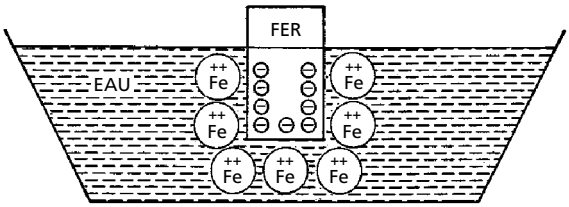


Figure 4.13 – Corrosion en phase aqueuse

□ Autres formes de corrosion électrochimique

La corrosion par aération différentielle est due à des différences de concentration en oxygène atmosphérique : les parties métalliques en contact avec les zones les plus aérées de l'électrolyte deviennent cathodiques, les autres devenant anodiques.

La corrosion galvanique concerne des couples de métaux plongés dans un quelconque électrolyte. Les métaux les plus électronégatifs se corroderont rapidement (Mg, Al, Zn, Fe). L'usage « d'anodes sacrificielles » en Zn permet de protéger des métaux de potentiel moins négatif (usage fréquent dans la marine).

La corrosion sous tension concerne des matériaux soumis à des contraintes en milieu aqueux qui rompent le film passif : il se crée une fissuration anodique.

Les corrosions par piqûres, caverneuses, intercristallines, représentent d'autres formes de corrosion électrochimique.

❑ Les autres formes de corrosions

□ Corrosion chimique

La mise en contact fortuite ou normale, temporaire ou permanente, de surfaces métalliques avec des produits agressifs peut entraîner une corrosion chimique : réaction chimique avec perte régulière de matière, formation de piqûres ou fissurations. Les agents corrosifs peuvent être des acides, des composés alcalins ou halogénés, des atmosphères réductrices ou oxydantes, et même des lubrifiants dont certains additifs peuvent réagir avec la surface qu'ils sont censés protéger !

☐ **Corrosion électrique**

Sous l'effet de « courants de fuite » (mises à la terre défectueuses, charges électrostatiques, courants induits), deux surfaces métalliques voisines peuvent être soumises à une différence de potentiel suffisante pour amorcer un arc entraînant une cratérisation caractéristique.

☐ **Corrosion bactérienne**

Les huiles de coupe ainsi que certaines eaux industrielles peuvent contenir des « ferrobactéries » aérobies (pseudomonas) ou anaérobies (leptothrix, crénothrix, galionella). Une bactérie se divisant toutes les 20 minutes, elle donne naissance à un milliard de bactéries en 12 heures…

Les bactéries aérobies donnent des acides (transformation d'hydrogène sulfuré provenant de putréfaction organique en acide sulfurique), les bactéries anaérobies attaquent les produits sulfatés pour donner du SH_2. Le diagnostic se fait par numération bactérienne (notons que le fioul peut être un vecteur de contamination). La prévention se fait en évitant les « bras morts » dans les réseaux et en utilisant des biocides.

4.2.4 Modes de défaillance des pièces plastiques et des composites

Les pièces à base de polymères, généralement associées au sein des systèmes à des pièces métalliques, ont des modes de défaillance semblables : usure, fatigue, rupture statique, fluage, etc.

Par contre, elles sont plus sensibles à l'influence du milieu ambiant : température, rayons ultraviolet, atmosphère, solvant, etc. De par la diversité des natures des matériaux plastiques (thermodurcissables, thermoplastiques, élastomères) et composites, nous limiterons notre description aux ruptures mécaniques et à leur mode de défaillance particulier qu'est le vieillissement. Nous renvoyons le lecteur au recueil de conférences édité par le CETIM en 1996, *Analyse de défaillances de pièces plastiques et composites*.

❑ **Ruptures mécaniques**

Comme pour les métaux, l'initiation provient d'un défaut matière ou d'une zone faible à partir de laquelle une fissuration va se propager sous contrainte et sous influence de l'environnement.

Les thermoplastiques, formés de chaînes macromoléculaires non liées, se déformeront, évoluant vers une rupture plus ou moins ductile.

Les thermodurcissables, formés de réseaux tridimensionnels, donc peu déformables, évoluent vers une rupture « fragile ».

Les élastomères, par nature très déformables, se rompent en mode « fragile ».

❑ **Vieillissement des polymères composites**

Le vieillissement est l'altération des propriétés des matériaux au cours du temps. Il est caractérisé par une modification structurelle par rupture de chaînes de poly-

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

mères. Il s'agit en général d'un vieillissement « combiné » sous des actions thermiques, photochimiques, atmosphériques, chimiques, mécaniques ou biologiques.

Les expertises relatives à l'impact du vieillissement sont affaires de spécialistes, les retours d'expérience étant plus limités que pour les pièces mécaniques, de structures moins diverses et de comportement plus homogène. Néanmoins, il est acquis que le choix du matériau et de sa mise en œuvre est déterminant quant à la durée de vie d'une pièce « plastique ».

4.2.5 Modes de défaillance des parties « commande » (PC)

❑ **Modes de défaillances relatifs à la logique câblée**

□ **Relais électromagnétiques**

Moins utilisés qu'avant 1970, moins fiables que la technologie électronique, ils sont encore présents dans bien des automatismes. Leurs modes de défaillance les plus fréquents sont :

– bobine de commande coupée, ou en court-circuit ;

– contacts soudés, collés fermés, érodés, corrodés ou « rebondissants » ;

– armature mobile bloquée ;

– défaut d'isolement d'un contact avec la carcasse métallique.

Ces défauts ont des causes électriques (surtension ou surintensité), mécaniques (usure) ou d'environnement (température, poussières, chocs, etc.) qui induisent une non-commutation, ou, plus rarement, une commutation non commandée.

□ **Composants électroniques passifs**

Les résistances ne s'usent pas, mais peuvent subir des surintensités qui créent des coupures ou des courts-circuits. Leur valeur nominale peut être affectée par des variations thermiques.

Les condensateurs s'usent sous tension et ils sèchent hors tension (gare à l'allumage après arrêts prolongés). Les surcharges provoquent la rupture du diélectrique.

□ **Composants électroniques actifs**

Ce sont les transistors et les circuits intégrés, mais aussi les thyristors et les triacs pour les circuits de puissance. De par l'intégration de plus en plus poussée des technologies SSI, MSI, LSI, VLSI contenant des milliers de portes, la fiabilité d'un circuit intégré est plus à considérer collectivement qu'au niveau du composant. Des tests de détection permettent de dire si le circuit est correct ou non. La localisation permet de situer le défaut au sein du composant.

Les mécanismes de défaillance concernent surtout les jonctions électroniques (semiconducteurs thermosensibles) et se manifestent par des « collages » à 0 ou à 1 (valeurs logiques). Causes potentielles de défaillances :

– les surcharges provoquent des pannes catalectiques par rupture de la jonction ;

– les décharges électrostatiques et certains rayonnements peuvent perturber le fonctionnement (parasites) ;

– les chocs thermiques dus à la répétition des « marche-arrêt » fragilisent la jonction par fatigue thermique ;
– le fonctionnement à basse température crée un « emballement » thermique du semi-conducteur.

□ Conducteurs et connexions

La connectique est la source de bien des défaillances intermittentes ou fugitives qu'il faut suspecter et vérifier avant de chercher à localiser des défauts internes. La fiabilité des connecteurs (cosses, wrapping, soudures) devrait être au moins de même valeur que celle des technologies associées, en logique câblée ou programmée. Ce n'est pas toujours le cas.

La fiabilité opérationnelle de la connectique est dépendante des conditions de l'environnement (corrosion et vibrations principalement).

❑ Modes de défaillances relatifs à la logique programmée

La logique programmée est par nature sensible aux perturbations énergétiques (surtension d'entrée), thermiques et surtout électromagnétiques de l'environnement. Dans un système programmable se retrouvent les composants actifs et passifs précédents, mais également des composants électroniques programmables, de fonction paramétrable et modifiable.

□ Défaillances des automates programmables et des calculateurs industriels

Un automate est plus vulnérable par son intégration à son environnement et par son utilisation que par ses faiblesses intrinsèques.

L'unité centrale d'un automate (alimentation + UC + bus + mémoire) est particulièrement fiable (seulement 10 % des défauts) ; les problèmes viendront pour 90 % des coupleurs et des cartes d'entrée et de sortie (logique électronique câblée). La cause majoritaire de défaillance des cartes d'entrée vient de surtensions.

Notons la maîtrise possible de l'effet d'une défaillance (interne, alimentation coupée, etc.) sur les sorties :

– remise à zéro de toutes les sorties,
– passage à un état prédéfini,
– gel des sorties à leur dernier état « normal ».

Notons également l'intégration de produits d'auto-contrôle, d'auto-test, d'identification à distance, de détection de défauts et de « chiens de garde » relatifs au déroulement des programmes.

Dans le cas des calculateurs, les claviers et les écrans cathodiques sont soumis à l'usure, et peuvent être blindés pour un usage à l'atelier.

□ Défaillances logicielles

Des statistiques relatives aux développements de logiciels applicatifs (CET 93) montrent l'existence d'un défaut pour 100 instructions, dont 2/3 sont dus à de mauvaises spécifications et 1/3 est dû à un mauvais codage. Ce sont des défaillances humaines ayant pour cause un manque de rigueur (syntaxe), de logique ou d'attention (oublis) (voir La fiabilité humaine, § 5.6).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ **Défaillances par incompatibilité électromagnétique**

☐ **Définition de la CEM (directive européenne 89/336/CEE et norme CEI 60-601)**

La compatibilité électromagnétique (CEM) est l'aptitude d'un équipement à bien fonctionner dans son environnement électromagnétique, et sans produire lui-même de perturbations dans cet environnement (pollution électromagnétique).

☐ **Équipement perturbé/perturbateur**

L'équipement est perturbateur lorsqu'il émet des signaux d'interférence :

– par rayonnement (champ électromagnétique capté par les « antennes » que deviennent les pistes et les câbles) ;

– par conduction (conducteurs, pistes de circuits imprimés). La perturbation est conduite lorsqu'elle est véhiculée par des conducteurs pouvant se comporter comme des selfs ou comme des capacités (couplage ou diaphonie).

L'équipement est perturbé par rayonnement ou conduction lorsqu'une source génère des signaux d'interférences au-delà du « seuil de susceptibilité », mesuré en V/m, de l'équipement. Au-dessous, il y a « immunité » ; au-dessus, il y a défaillance. Les perturbations se matérialisent sous forme de pannes fugitives ou de pertes de mémoire. Il est possible de remonter le niveau d'immunité par « durcissement » (utilisation de filtres antiparasitage, de blindage, de vernis conducteurs, de cages de Faraday anéchoïques munies d'absorbants d'hyperfréquences).

Exemples d'appareils « perturbateurs »

Les téléphones cellulaires, les stimulateurs cardiaques, les détecteurs de métaux, les radars, etc. Penser aussi à suspecter l'électricité statique, les commutations, la proximité de courants forts et faibles qui passent parfois dans la même goulotte !

4.3 Méthodologie du diagnostic

4.3.1 Terminologie et commentaires

❑ **Définitions relatives au diagnostic**

☐ **Définitions CEN**

– Diagnostic de panne : « actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause ».

– Localisation de panne : « actions menées en vue d'identifier le bien en panne au niveau de l'arborescence appropriée ».

– Panne : « état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise […] ».

☐ **Autres définitions utiles**

Rappel de la définition AFNOR du diagnostic : « identification de la cause d'une défaillance à l'aide d'un raisonnement logique ».

Rappel de la définition de l'expertise : « identification du mécanisme d'une défaillance ».

☐ Commentaires à partir des définitions

1. L'aspect cognitif du diagnostic « activité cérébrale »

La définition AFNOR servira notre propos par sa référence à l'aspect cognitif du diagnostic qu'est un « raisonnement logique » et par son caractère généralisé : le diagnostic ne concerne pas uniquement les pannes, mais n'importe quelle « anormalité » constatée (en gestion de maintenance en particulier).

2. L'enjeu lié à la réalisation d'un diagnostic

De la définition CEN nous retiendrons la distinction entre « localisation » et « diagnostic », qui correspond à une confusion fréquente du milieu professionnel : un dépanneur n'a pas réalisé un diagnostic lorsque, ayant localisé un module défaillant à l'intérieur d'un système, il le change ou le répare. Il a retrouvé une fonction perdue, mais il n'a rien pu améliorer, puisqu'il n'a pas identifié la cause ! Un dépannage est une panne effacée. Cette action n'a aucune valeur ajoutée. Seul le diagnostic permet une amélioration : c'est une panne résolue. Cela est fondamental en maintenance : le diagnostic contient et dépasse la localisation, mais lui seul contient une potentialité de progrès par des actions sur la ou les causes.

3. L'arborescence des causes

À partir d'une défaillance, il est possible de construire un arbre des causes conjuguées, intrinsèques et extrinsèques, par niveaux successifs : quelles sont les causes de la cause ?

4. Expertise et diagnostic

Le diagnostic concerne la recherche des causes des niveaux bas de l'arborescence. L'expertise est la recherche des causes « premières » par approfondissement des niveaux supérieurs de l'arbre des causes. Le paragraphe 4.2 précédent nous a montré que cette investigation implique de « rentrer dans la matière » par l'étude des mécanismes de dégradation.

❑ Les champs d'application de la méthodologie du diagnostic

Il est facile de vérifier la similitude de tous les outils d'analyses liés à la compréhension ou à la prévision des anormalités des domaines listés à la figure 4.14. Il en est de même pour la méthodologie du diagnostic. Notons que cette convergence est un élément heureux pour faciliter le « décloisonnement » de ces différents secteurs, dans une logique de qualité totale.

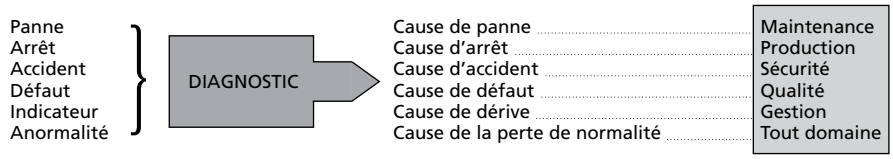


Figure 4.14 – Champs d'application du diagnostic

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ **Le diagnostic : un raisonnement logique modulable**

Suivant la criticité de la défaillance à élucider, suivant la motivation et la compétence du technicien ou du groupe chargé de résoudre la défaillance, plusieurs niveaux d'analyse sont possibles, comme le montre la figure 4.15.

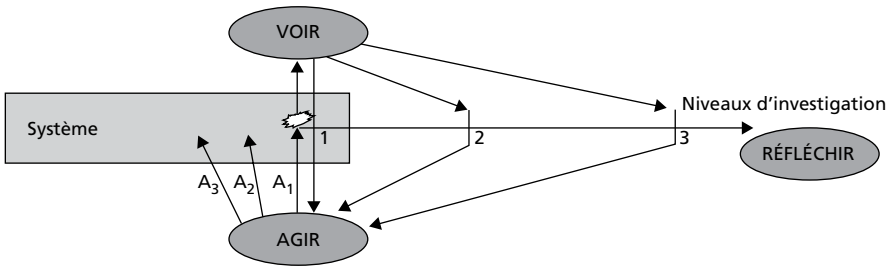


Figure 4.15 – Diagnostic : les niveaux d'investigation par réflexion

Niveau 1 : « je vois, j'agis ». L'écrou est desserré, je le resserre. Le roulement est dégradé, je le remplace à l'identique. L'action A_1 est réflexe, souvent de routine, et n'exige pas de réflexion. Caractéristique du dépannage, elle restitue provisoirement une fonction perdue en s'exerçant souvent sur « l'effet » d'une pathologie qu'est un composant dégradé et localisé de façon plus ou moins évidente.

Niveau 2 : nous parlons de diagnostic dès lors qu'un raisonnement a permis d'identifier une ou plusieurs causes intrinsèques ou extrinsèques. L'action A_2 contient A_1 + des actions sur les causes identifiées.

Niveau 3 : il peut s'agir d'un diagnostic avec actions $A_1 + A_2 + A_3$ sur plusieurs niveaux de causes ou d'une expertise élucidant un mécanisme de défaillance. Les actions A_3 sont alors actives à long terme, visant à éviter la réapparition de la défaillance. Et elles seront reportées sur les systèmes identiques ou intégrées aux systèmes futurs.

4.3.2 Méthodologie : les étapes d'un diagnostic

Le diagnostic est la phase terminale de l'analyse de défaillance (voir § 4.1.3). Alors que le dépannage est réalisé en temps réel, souvent sous la pression et le stress (durée de l'arrêt), le diagnostic peut être différé, la détection et la localisation étant suffisantes pour dépanner provisoirement.

❑ **Recueil d'informations et observation des symptômes**

Nous avons vu au paragraphe 4.1.3 quelles informations préliminaires sont nécessaires à la compréhension d'une défaillance et au paragraphe 1.4.1 comment « observer ».

□ **Observation des symptômes**

Qu'est-ce qu'un symptôme ? C'est un changement d'état physique recueilli dans l'environnement du système. Il est dû à la défaillance du système. C'est un symptôme qui déclenche la détection, parfois la décision de maintenance conditionnelle

lorsqu'il s'agit d'une dégradation. Le conducteur du système est naturellement le « témoin » observateur privilégié des symptômes. Soit le système défaillant schématisé dans la figure 4.16 :

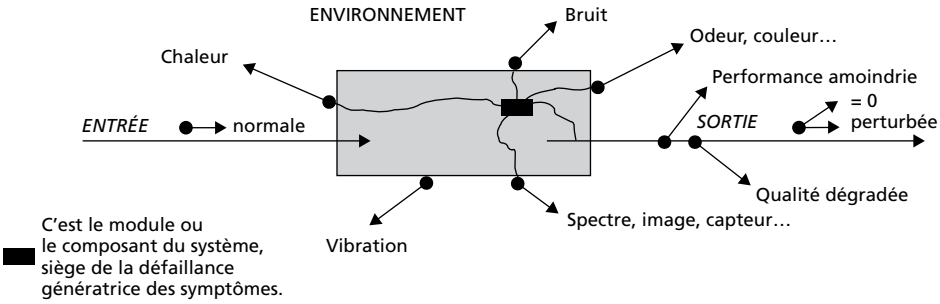


Figure 4.16 – Observation des symptômes en fonctionnement

L'observation première se fera dans l'environnement du système. À ces symptômes « en fonctionnement » s'ajoutent tous les éléments (symptômes secondaires) à réunir après défaillance, démontage et analyse fine du composant élémentaire localisé (observation du faciès en cas de rupture, traces de fissurations, faïençage d'une surface, etc.). Des symptômes « indirects » tels qu'une hausse de consommation observée sur une facture d'énergie peuvent être réunis aux observations directes.

□ Au-delà du symptôme…

Un symptôme est un changement d'état physique observable (cinq sens) et/ou mesurable, caractéristique d'une perte de normalité sous l'influence d'un phénomène pathologique φ_1.

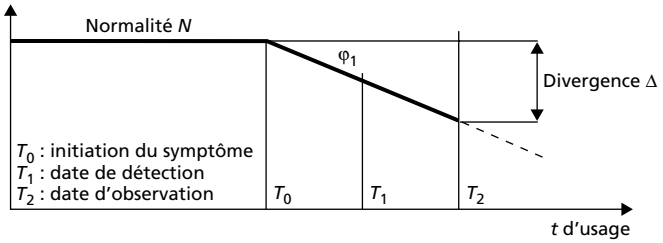


Figure 4.17 – Un symptôme est une divergence

Le travail d'observation consiste à comparer ce qui est (observation factuelle) avec ce qui devrait être (normalité, signature, référence). Le système est dit « divergent » lorsque son environnement varie, depuis l'initiation à T_0, à la détection T_1 et à l'auscultation T_2 (écart Δ par rapport à la normalité).

Nous sommes alors dans la problématique du « thermomètre médical » à 39 °C. Nous pouvons :

– casser le thermomètre, ce qui correspond au refus de voir un symptôme « dérangeant » ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– vouloir le faire descendre à sa normalité par « action sur la fièvre » : cela soulage momentanément, mais masque la pathologie et ne la guérit aucunement : que va-t-il se passer ensuite ?
– corréler ce symptôme avec d'autres et raisonner pour obtenir l'identification, avec une certaine probabilité d'un phénomène pathologique; d'où une ordonnance en médecine, des préconisations en maintenance.

❑ Localisation du siège de la défaillance

La localisation consiste à enfermer la défaillance dans le plus petit composant possible, à partir de l'arborescence fonctionnelle du système défaillant. Elle permet d'identifier le composant siège de la défaillance, mais non la cause.

Cette démarche est dans tous les cas indispensable. Elle est parfois évidente (cas d'une rupture), parfois délicate lorsqu'elle requiert des tests (en électronique) ou une logique structurée à partir de schémas (électriques, hydrauliques). Cette logique de recherche, à laquelle les dépanneurs sont habitués, est facilitée par une analyse fonctionnelle de type SADT qui permet, après avoir validé les entrées (énergies, commandes, matières) et vérifié la perte de fonction en sortie, d'enfermer la défaillance au niveau testé.

L'action de remise à niveau ou de remplacement du composant incriminé permet le dépannage palliatif.

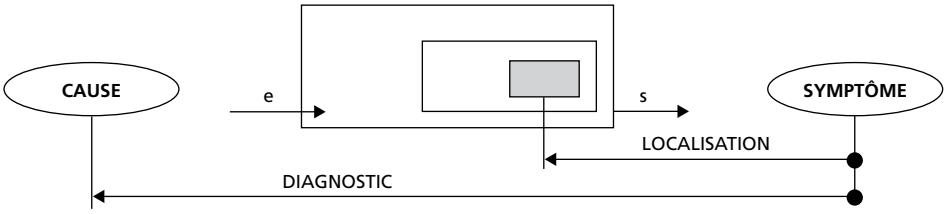


Figure 4.18 – Ne pas confondre diagnostic et localisation

Exemple

Soit un circuit hydraulique normalement alimenté (pompe tournante) dont un vérin ne sort plus. Une démarche structurée (observation du retour de l'huile à la bâche) nous amène à incriminer le limiteur de pression (module), puis le ressort rompu (composant élémentaire). Le remplacement de l'un ou de l'autre permet le dépannage par localisation. Au-delà, le diagnostic nous amènera au phénomène de fatigue, puis l'expertise à la nature non optimale du matériau.

Faut-il aller au-delà de la localisation ? Non si cette panne n'est pas répétitive. Oui si l'on veut éviter d'avoir 10 arrêts fortuits et de stocker 10 ressorts de rechange par an.

❑ La nature probabiliste du diagnostic

Toute émergence de défaillance est le résultat de mécanismes rationnels dans lesquels la fatalité ne joue aucun rôle. Nous sommes dans un champ déterministe : il n'y a pas plus de fumée sans feu que de symptômes sans causes !

Le diagnostic est semblable à une enquête policière : le policier part de ses observations sur et autour de la victime pour chercher l'identité du coupable, éventuellement avec l'aide de témoins oculaires. Le technicien de maintenance est dans la même situation, sachant qu'il est motivant d'avoir la certitude qu'une cause existe (déterminisme), mais que la trouver est du domaine probabiliste. Plus les symptômes et les informations seront nombreux, plus la recherche sera facilitée. Le « client » opérateur de production est alors un témoin incontournable. La recherche consiste à bâtir des hypothèses, en corrélation avec les faits constatés, affectées d'un niveau de probabilité plus ou moins important. Puis de tester l'existence de ces causes à partir de deux critères : l'occurrence et la facilité du test (avec ou sans démontage, par exemple).

Il reste ensuite à vérifier le bien-fondé du résultat, puis éventuellement à approfondir le diagnostic par la recherche de la cause de la cause ou à mettre en œuvre une expertise pour mettre en évidence les mécanismes de défaillance et en déduire des remèdes.

Plus le niveau de cause est élevé, plus les remèdes associés auront une efficacité à moyen, puis long terme. Pour une migraine ophtalmique, le port de lunettes dispense de bien des cachets d'aspirine.

❑ L'arborescence des causes

Les notions de cause première et de cause unique sont des notions réductrices. En effet, à chaque cause identifiée et vérifiée, il est possible d'associer une ou plusieurs causes de niveau supérieur, ce qui génère soit une cascade de causes successives (méthode de l'escalier Kepner Tregoe, voir KEP 74), soit un arbre de causes.

□ La méthode de l'escalier

Soit P_i le mode de panne caractérisé par son effet E_i, C_i la cause correspondante, I_c l'action corrective correspondante.

La figure 4.19 illustre la méthode : à partir de la détection d'une défaillance par ses symptômes « bruit, vibrations, couple résistant irrégulier, etc. », la localisation (facile) incrimine un roulement à billes d'un palier (graissage centralisé).

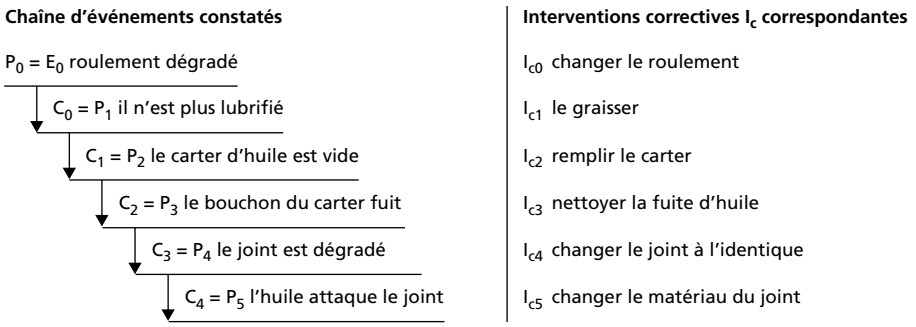


Figure 4.19

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Au dépannage I_{co}, indispensable, mais efficace à très court terme, il faut ajouter les actions $I_{c1} + I_{c2} + I_{c3} + I_{c5}$. Nous aurons ainsi la maîtrise de cet événement pour le futur dès lors que l'on a trouvé un joint compatible avec la nature de l'huile. Aller plus loin nous fait entrer dans le domaine de l'expertise, l'explication du mécanisme se trouvant dans une réaction de chimie organique que le technicien de maintenance n'a pas à maîtriser.

Remarquons la relation de causalité, l'événement P_2 « carter vide » étant à la fois cause de P_1 et effet E_2.

☐ La méthode de l'arbre des causes envisagées

Le principe est le même, enrichi par des portes ET/OU qui visualisent les hypothèses de la démarche diagnostic. Reprenons le même exemple et traçons l'arbre des causes correspondant (figure 4.20).

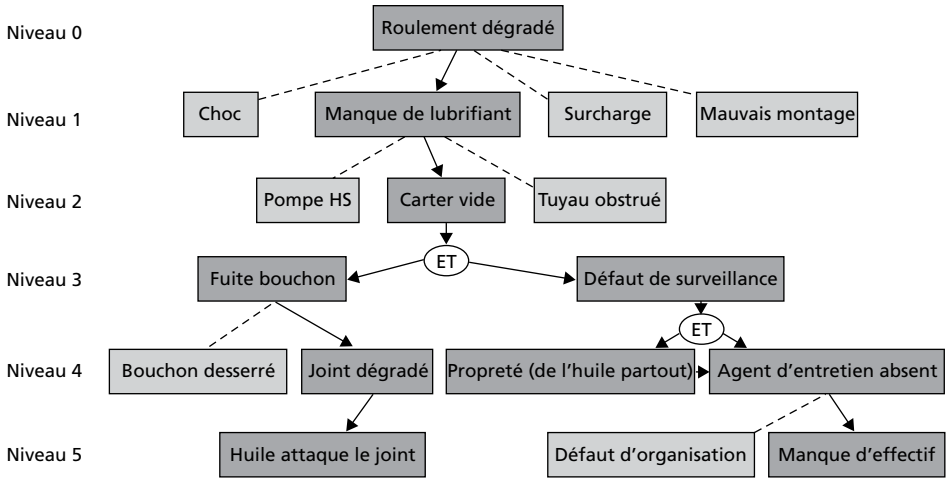


Figure 4.20 – La recherche des causes initiales

Cet arbre des causes montre la recherche simultanée de causes intrinsèques et extrinsèques (exemple des niveaux 3 et 4). Comme pour la méthode en cascade, à chaque niveau sont associées des actions correctives possibles.

Remarquons que la démarche nous amène systématiquement à identifier deux causes « premières ». L'une, intrinsèque, est la mise en cause de la matière et de son comportement. L'autre, extrinsèque, concerne l'homme avec ses lacunes, qu'il soit concepteur, fabricant, gestionnaire, mainteneur, utilisateur ou usager.

4.3.3 Quelques réflexions à propos du diagnostic

❑ À propos de l'erreur de diagnostic

Le technicien chargé d'un diagnostic se trouve dans une situation paradoxale : aller vite dans une situation d'urgence pour réduire le délai de remise à disposition, et aller lentement pour assurer la qualité et la sécurité d'une opération qui requiert soin, rigueur, lucidité, tests et essais !

D'où l'intérêt des dépannages à chaud repris ultérieurement par une analyse de défaillance et un diagnostic et par des mesures à froid (voir § 10.5 : le GAP, groupe d'analyse de pannes).

Comment naît l'erreur de diagnostic ?

– par délit d'habitude : on reconduit un diagnostic souvent rencontré ;
– par erreur de représentation, décalage entre l'idée que l'on se fait d'une situation et la situation réelle ;
– par manque de rigueur : l'observation est incomplète et trop superficielle ;
– et tout autre processus lié à l'homme et à son environnement, étudié au paragraphe 5.6, La fiabilité humaine.

❑ À propos de la pratique du diagnostic

La défaillance ignore les « frontières corporatives » entre les domaines (mécaniques, électroniques, hydrauliques, etc.), qui séparent parfois les différents « investigateurs » chargés de la localisation ou du diagnostic. Le diagnostic exige donc une grande polyvalence.

La coupure « utilisateurs/maintenance » fait baisser de 50 % la probabilité d'un bon diagnostic rapide. C'est un argument de poids en faveur de la TPM dans laquelle l'opérateur, formé au premier niveau de maintenance, collaborera facilement à des diagnostics plus délicats : c'est lui qui connaît le mieux la normalité du système, et donc les indices ou symptômes divergents.

L'empirisme, l'habitude, le « flair » permettent la résolution de dépannages usuels. Ils deviennent dangereux dès lors que les technologies s'imbriquent et que le diagnostic se complique.

La « vitesse de diagnostic » (ou de localisation) est un critère important de disponibilité des parties « commande ». D'où l'intérêt d'intégrer aux automates des sorties dédiées à la maintenance et d'utiliser des testeurs permettant « l'auto-localisation » d'un composant défectueux.

La problématique du diagnostic ne concerne pas seulement les défaillances « techniques » pour lesquelles des préconisations non techniques (amélioration de l'organisation, de la formation) peuvent être proposées. Pour la maintenance, le diagnostic peut s'appliquer à la gestion. Par exemple, une consommation « anormale » d'énergie, de rechanges, de produits, un indicateur de gestion « à la baisse » peuvent et doivent être diagnostiqués.

❑ L'enjeu d'un diagnostic approfondi : les remèdes à apporter

L'idée-force à mettre en évidence est que l'action postdiagnostic sera d'autant plus efficace qu'elle portera sur des niveaux élevés de causes identifiées. À court terme, l'action palliative est souvent la seule possible : quand il y a le feu, le moment est mal venu de choisir un détecteur de fumée et de l'installer. Par contre, le feu une fois maîtrisé, toutes les analyses, réflexions et préconisations postévénementielles deviennent possibles et utiles.

Remarquons en particulier qu'une action sur un niveau de cause est corrective, au sens de « guérir » d'une défaillance passée. Mais elle est également préventive par rapport aux défaillances à venir et qu'elle permet d'éviter. C'est là sa richesse de

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

« vaccin antipanne » et c'est là la meilleure source pour mettre en œuvre une politique préventive par exploitation du retour d'expérience.

4.4 Les analyses quantitatives de défaillances

4.4.1 Exploitation des relevés de défaillances

❑ Situation du problème : la recherche des priorités d'action

Nous avons vu qu'un « historique » n'a d'intérêt que par l'exploitation qui en est faite. Il appartient à l'agent des méthodes du secteur de suivre les évolutions du comportement de chaque équipement afin d'en déduire des priorités d'action. L'agent des méthodes a trois types d'information à sa disposition :

– le DTE, dossier technique de l'équipement analysé (voir § 3.3);
– les données quantitatives contenues dans l'historique (voir § 3.5);
– les données qualitatives relatives aux analyses de défaillance (fiches d'analyse de défaillance et expertises, voir § 4.1.3).

En fait, ce sont les analyses quantitatives qui orientent le choix des actions d'amélioration, donc les défaillances à approfondir pour pouvoir les corriger et les prévenir.

❑ Nature des données chiffrées

Sont saisies :

– les dates (jours, heures) d'interventions correctives, qui permettent d'en déduire les durées de bon fonctionnement (*TBF, time between failures*) et leur moyenne (*MTBF*) ainsi que le nombre *N* de défaillances. La saisie de ces durées permettra de caractériser la *fiabilité* de l'équipement;
– les temps d'arrêt de production (T_A) intrinsèques au matériel et inhérents à chaque défaillance, y compris les durées de « microdéfaillances » relevées en minutes ou en 1/100 d'heures). La saisie de ces données permettra de caractériser la *disponibilité* de l'équipement;
– les durées d'intervention (*TTR*, *time to repair*) et leur moyenne (*MTTR*). La saisie de ces données permettra de caractériser la *maintenabilité* de l'équipement.

❑ Mises en familles

Chacune des saisies précédentes, relative à un équipement ou à un tronçon de ligne de production, doit être imputée par codification à une des familles étudiées au paragraphe 3.5.2. En particulier, deux familles sont riches d'enseignements :

– la localisation, décomposition structurelle au niveau des modules sensibles;
– les modes de défaillance de l'équipement observés le plus fréquemment sur le terrain.

4.4.2 Diagrammes de Pareto

Les diagrammes de Pareto permettent de sélectionner des actions prioritaires à mettre en œuvre, à partir de données statistiques objectives. Ils permettent égale-

ment de communiquer grâce à leur facilité d'interprétation visuelle. Nous en étudierons les trois formes d'usages complémentaires :

– la méthode ABC de Pareto, d'usage très polyvalent ;
– le diagramme de Pareto en bâton, simple à utiliser, dont la lisibilité facile fait un bon outil de communication ;
– les trois diagrammes de Pareto en NT, outil spécifique de la maintenance qui permet, outre la détermination des éléments qui pénalisent le plus la disponibilité d'un équipement, d'analyser les pistes d'action à mettre en œuvre.

❑ La méthode ABC de Pareto

□ Principe de la méthode ABC

Wilfredo Pareto (1848-1923) était un économiste italien, membre du groupe de Lausanne. Il fut le précurseur de l'économie mathématique. Ayant à étudier la répartition de l'impôt foncier aux États-Unis, il constata que 15 % des contribuables payaient 85 % du total. Cette loi de Pareto, dite loi ABC ou loi des 20/80, illustre de nombreuses répartitions. Quelques exemples :

– 20 % des conducteurs ont 80 % des accidents ;
– 25 % des voies ferrées voient passer 75 % du trafic ;
– 15 % des articles vendus représentent 75 % du chiffre d'affaires, mais aussi, en corollaire, 50 % des articles ne représentent que 15 % du chiffre d'affaires.

En maintenance :

– 20 % des machines ont 75 % des défaillances enregistrées ;
– 20 % des rechanges en magasin représentent 85 % des immobilisations ;
– 15 % des bons de travaux couvrent 65 % des heures d'atelier, mais aussi, en corollaire, 55 % des BT (bons de travaux) ne couvrent que 20 % de la charge de travail.

La méthode ABC permet donc au gestionnaire d'identifier des cibles d'actions prioritaires, mais également de déterminer les éléments négligeables pour alléger l'étude.

□ Pratique de la courbe ABC

La courbe de la figure 4.21 associe aux éléments classés portés en abscisses les critères cumulés portés en ordonnées. Elle traduit des valeurs numériques de critère en pourcentages beaucoup plus « parlants ».

Exemple : 17 850 €, est-ce important ? La réponse ne peut être que *relative*. Cette somme est négligeable si elle représente 0,8 % d'un cumul étudié. Elle est importante si elle représente 88 % des valeurs cumulées.

Les n_a éléments de la classe A (soit 15 % des N éléments) représentent 60 % du critère cumulé : ils sont à considérer prioritairement.

Les N-n_b éléments de la classe C (soit 60 % des N éléments) ne représentent que 10 % du critère : il est légitime de les négliger dans une première phase.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

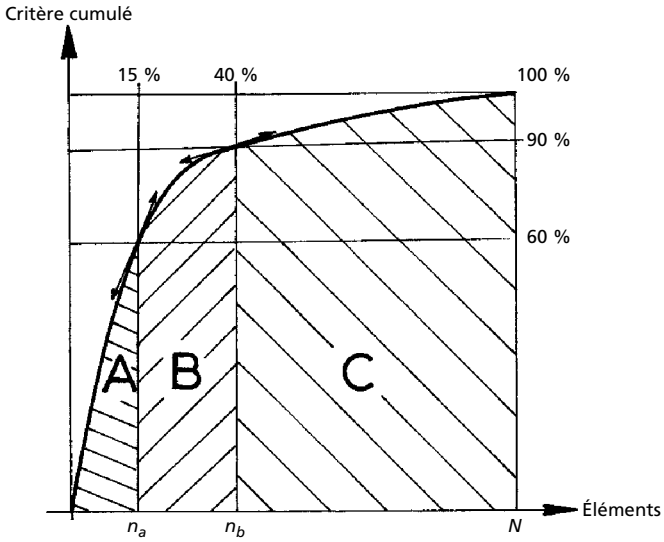


Figure 4.21 – Principe de la loi ABC

☐ **Exemple : analyse du poids des différentes pannes sur l'indisponibilité d'un équipement**

1. Déterminer le cadre et les limites de l'étude :

– objet de l'étude : quel choix veut-on faire ?

– définir la nature des éléments à classer et leur mise en famille ;

– choisir le critère de classement (temps ou coûts le plus souvent) ;

– sélectionner la période représentative du caractère étudié (souvent une année).

2. Réaliser un tableau de classement (tableau 4.1).

Tableau 4.1 – Tableau de classement

Intervention n° 0 T	Temps d'indisponibilité	Classement
234	2 h	43e
235	14 h	5e
236	8 h	11e
237	3 h	31e
238	11 h	9e
…	…	…

3. Réaliser un tableau ordonné (tableau 4.2) : classement des éléments par valeurs décroissantes du critère.

Tableau 4.2 – Tableau ordonné

Classement	Intervention n° 0 T	Temps d'indisponibilité cumulés
1	196	28 h
2	268	50 h
3	224	69 h
4	254	84 h
5	235	98 h
...	...	...

4. Tracer la courbe ABC (figure 4.22).

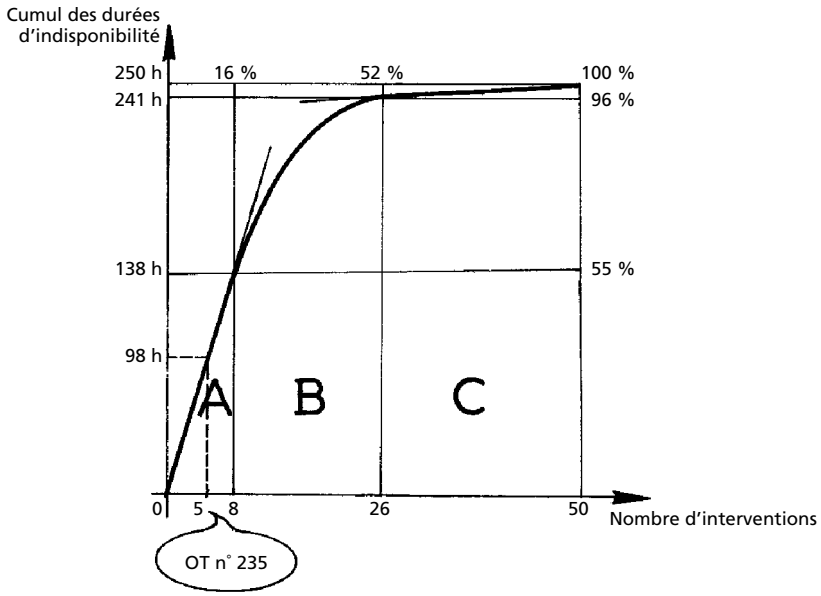


Figure 4.22 – Exemple de courbe ABC

5. Interpréter la courbe.

16 % des BT (8 interventions correctives) consomment 55 % des temps de non-disponibilité d'un système : ces interventions méritent une préparation soignée et

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

une recherche d'amélioration. En particulier, les huit premiers OT seront analysés qualitativement pour détecter les gisements de gain de productivité. Soit en évitant leur réapparition (diagnostic et actions sur les causes), soit en les rendant moins pénalisants.

48 % des BT (zone C) se rapportent à une non-disponibilité de 4 % : ces interventions ne méritent aucune attention à court terme, sauf critère de risque.

❑ Le diagramme de Pareto simple

□ Préparation des données

Elle se fera manuellement ou par un tableur (Excel) ou avec l'aide d'une GMAO, pour une période de relevé significative (de une semaine à un an). Le tableau 4.3 donne un exemple d'utilisation : soit 1 semaine de relevés pour une machine d'insertion de composants électroniques. 55 interventions ont été relevées, dont 34 sous forme de micro-défaillances hautement répétitives liées principalement au mauvais positionnement de la navette (déréglages). Cet échantillon hebdomadaire d'interventions correctives correspond à 13,72 heures d'arrêt de production, qu'il est urgent de réduire.

Tableau 4.3 – Tableau d'analyse quantitative de défaillances : critère de durée d'intervention

Équipement	Famille de sous-ensembles		*N* Nombre	Σ*TTR* Durées	*TTR* %	*MTTR* Moyenne
Machines d'insertion	A	Partie commande	3	1,05 h	7,6 %	0,35 h
	B	Spreader	2	3,30 h	24,3 %	1,65 h
	C	Navette	34	5,17 h	37,7 %	0,15 h
	D	Magasin composants	2	0,50 h	3,6 %	0,25 h
	E		1	1,00 h	7,2 %	1,00 h
	F		12	2,40 h	17,5 %	0,20 h
	G		1	0,30 h	2,2 %	0,30 h
	Ensemble		55	13,72 h	100 %	0,25 h

□ Réalisation du diagramme de Pareto simple

La mise sous forme graphique du tableau 4.3 a une valeur d'aide à la réflexion et de communication. Elle se réalise en classant les familles par ordre des valeurs décroissantes du critère retenu, exprimé en valeurs absolues ou relatives (%) ou les deux.

Le graphe de Pareto (figure 4.23) est établi sur le critère « durée d'intervention » du tableau précédent, qui correspond dans notre exemple à des pertes de production… Ce graphe montre la parenté existant avec la courbe ABC, qui fournit la même cible d'action prioritaire, mais de façon moins « visuelle ».

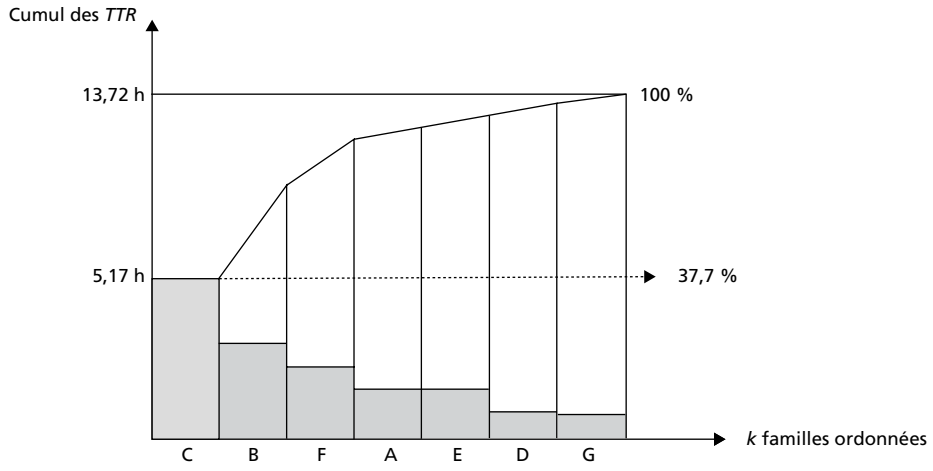


Figure 4.23 – Détermination des cibles d'action prioritaire

❑ Un outil de maintenance : le diagramme de Pareto en *NT*

Cet outil est dédié aux analyses de pannes. Il consiste à tracer trois graphes portant successivement en ordonnées :

$N \cdot MTTR = \Sigma TTR$ (ou ΣTA), cumul des N durées d'intervention (ou d'arrêt), qui sera un indicateur de non-disponibilité ;

N, nombre de pannes enregistrées par familles, qui sera un indicateur de non-fiabilité ;

MTTR, moyenne des durées d'intervention (ou *MTA*) par famille, qui sera un indicateur de maintenabilité.

Les abcisses seront ordonnées par criticité décroissante des familles analysées sur le premier graphe en NT. Dans notre exemple, nous prendrons comme critère d'analyse les durées d'arrêt de production *TA*.

□ Réalisation et interprétation des trois diagrammes

Graphe 1 : indicateur de non-disponibilité

Les familles C + F représentent 44 % de l'indisponibilité. La réduction des temps d'arrêt dus à C et F est donc prioritaire. L'analyse des graphes 2 et 3 orientera nos actions :

– vers l'amélioration de la fiabilité pour C ;

– vers l'amélioration de la maintenabilité pour F.

Graphe 2 : indicateur de non-fiabilité

C est du type « microdéfaillance » répétitive ($N = 14$), ainsi que A puis I qui sera négligé. C sera analysé et diagnostiqué prioritairement ; bien que d'effet « apparent » modeste, c'est la panne la plus pénalisante « objectivement ».

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Graphe 3 : indicateur de non-maintenabilité

F, H et G sont des pannes durables. Seule F sera analysée, H éventuellement. La panne G, survenue une fois, a un impact négligeable.

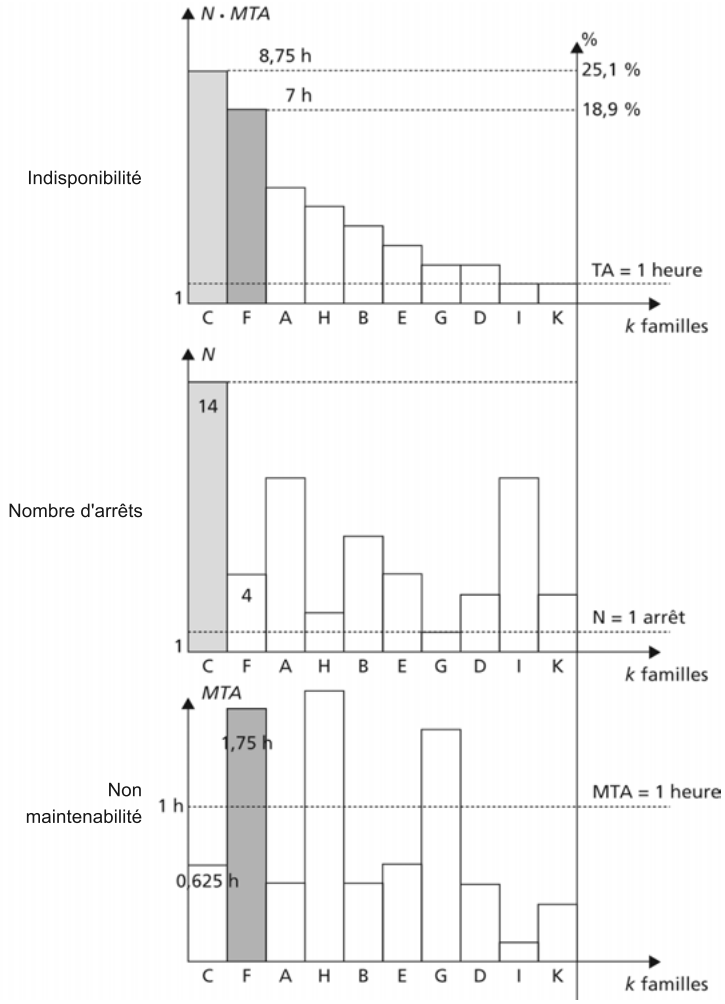


Figure 4.24 – Les trois diagrammes de Pareto en $N \cdot T$

☐ **Utilisation des trois diagrammes**

Selon la loi de Pareto, nous savons a priori que 15 à 20 % des sous-ensembles vont être responsables de 50 à 80 % des temps d'immobilisation d'un équipement.

Le graphe 1 en NT (Indisponibilité)

Il a pour objectif l'amélioration de la disponibilité d'un équipement par actions sur les sous-ensembles qui grèvent la performance de l'ensemble (C, F, puis A, H dans notre exemple).

Ce graphe résout simplement un problème moins évident qu'il n'y paraît : quelles sont les pannes que nous devons objectivement (par quantification) et prioritairement chercher à réduire ? Quel est leur impact sur la disponibilité ? Sur quel module faut-il faire du préventif ? Quelles défaillances faut-il analyser ?

Mais aussi il résout un problème corollaire pas plus évident sans mesures : quels sont les événements à négliger (pour le moment). Nous avons tous vu de brillants techniciens s'acharner sur un problème passionnant (G dans notre exemple) qui, sur le plan économique, ne mérite pas cinq minutes d'attention.

Remarquons à propos de ce diagramme que le critère $N \cdot MTA = \Sigma TA$ est proportionnel aux coûts d'arrêt et de pertes de production ($C = \tau \cdot TA$), τ étant le coût horaire de perte de production. Ce qui rend cet outil exploitable pour dégager des priorités d'action sur des bases de criticité économique.

Le graphe 2 en N (Nombre d'arrêts)

Il oriente vers l'amélioration de la fiabilité des sous-ensembles pénalisants. Il met en évidence le poids relatif des microdéfaillances répétitives, souvent négligées à tort si elles ne sont pas saisies (voir § 10.5 : le poids des microdéfaillances). Les actions envisageables sont :

– des modifications techniques (changer de marque de composant, pérenniser les réglages, appliquer le diagnostic et ses remèdes aux petits problèmes répétitifs) ;
– des modifications d'organisation (surveillance accrue, fiches d'automaintenance, consignes de conduite) ;
– maintenance préventive appliquée aux petites pannes répétitives.

À plus long terme, la TPM apporte une bonne réponse par sa réactivité aux microdéfaillances.

Le graphe 3 en T (Non maintenabilité)

Il oriente vers l'amélioration de la maintenabilité et de la logistique concernant les pannes « durables » telles que F et H de notre exemple. Sachant que la maintenabilité est essentiellement prédéfinie à la conception, les pistes d'amélioration porteront :

– sur la préparation du travail (gammes d'intervention, outillage, testeurs, moyens à disposition) ;
– sur la réalisation des interventions en temps différé (interchangeabilité des modules) ;
– sur la logistique (moyens et rechanges disponibles) ;
– sur la formation et l'efficacité des techniciens.

Il est toujours plus efficace d'éviter l'apparition d'une panne que de vouloir réduire la durée de l'arrêt postpanne. Pour une panne identifiée, $N = 0$ est envisageable (suppression par action sur la cause), alors que $MTTR = 0$ est utopique.

Remarque

Cet outil est adaptable à d'autres problèmes de maintenance. Ainsi, en gestion des stocks, le produit $N_i \cdot C_i$ = nombre de sorties × coût de la pièce i sortie est analysé par une mise en deux familles :

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– un grand nombre de pièces peu coûteuses $N \cdot c$,
– un petit nombre de pièces coûteuses $n \cdot C$.
Cette analyse peut aider à l'organisation rationnelle d'un magasin, les pièces les plus fréquemment demandées étant évidemment rangées à proximité immédiate des guichets.

4.5 Les analyses prévisionnelles de défaillances : apport de la sûreté de fonctionnement (SdF)

4.5.1 Sûreté de fonctionnement et maintenance

❑ Définitions et commentaires

□ Définition CEN de la sûreté de fonctionnement

« La sûreté de fonctionnement est l'ensemble des propriétés qui décrivent la disponibilité et les facteurs qui la conditionnent : fiabilité, maintenabilité et logistique de maintenance. »

□ Commentaires

Cette définition européenne ramène la SdF au concept de « disponibilité prévisionnelle » en supprimant du concept SdF antérieur la sécurité :

$$\text{SdF} = \text{Disponibilité} + \text{Sécurité}$$

Pour notre propos, nous nous limiterons aux techniques qui permettent de prévoir, puis de supprimer les pannes à l'origine. En effet, pour la maintenance, la meilleure panne est celle qui n'arrive pas, une bonne panne est celle que l'on a prévue, la pire étant la panne inattendue, au mauvais endroit et au mauvais moment.

❑ Construire la qualité : apport de la SdF à la maintenance

La sûreté de fonctionnement et le soutien logistique intégré (noté SLI, développé au paragraphe 10.4) sont les deux composantes qu'il est possible d'intégrer à la conception d'un système aux fins d'améliorer ses performances futures et de faciliter sa maintenance ultérieure.

□ De la SdF high tech…

Les techniques de la SdF ont largement fait la preuve de leur efficacité, en particulier en sûreté nucléaire, en aéronautique, dans le domaine spatial et celui des télécommunications.

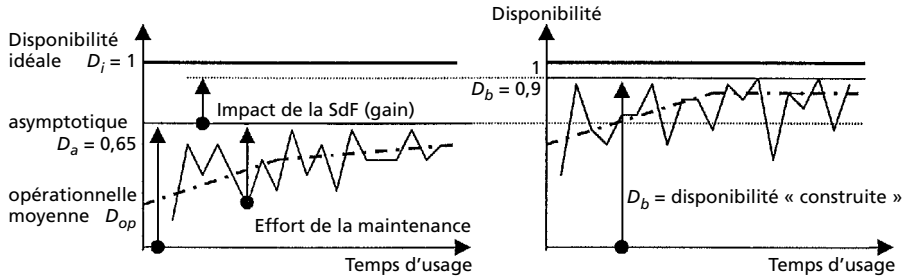
Ces techniques de conception « haut de gamme » semblent réservées à certains domaines, mais ne concernent pas ou très peu les industries, PMI en particulier, qui ne peuvent se permettre d'embaucher un « fiabiliste » à bac + 10.

□ … à la SdF pour PMI

Il suffit de connaître le concept du « coût du cycle de vie » d'un équipement (voir § 9.4) pour savoir qu'il sera performant (en disponibilité) s'il est « bien né ». Quand

ce n'est pas le cas, beaucoup d'efforts, donc de coûts de maintenance, seront nécessaires pour l'amener et le maintenir à ses propres limites. La disponibilité asymptotique D_∞ quantifie cette limite « construite » que les mesures de disponibilité opérationnelle mettent en évidence suivant les graphes de la figure 4.25.

D_a et D_b sont les disponibilités asymptotiques (ou intrinsèques) de deux équipements semblables. Le premier est conçu avec une faible anticipation de ses conditions d'exploitation ultérieure : l'effort de la maintenance sera insuffisant pour atteindre un niveau de performance compétitif. Le second, « bien né », sera performant à moindre coût de maintenance.



D_a et D_b sont les disponibilités asymptotiques (ou intrinsèques) de deux équipements semblables.

Figure 4.25 – Construire ou améliorer la disponibilité d'un équipement : impact de la SdF

« Vous ne gagnerez pas le Grand Prix de l'Arc de triomphe avec un bourricot, même s'il est bien nourri et bien entraîné. » Curieusement, certaines entreprises s'acharnent à vouloir gagner le grand prix de la compétitivité avec des équipements peu fiables et peu maintenables qui exigent des dépenses fortes de maintenance pour un résultat médiocre.

Or, le coût de perte de production pour une ligne de conditionnement qui a une disponibilité de 0,65 suffit pour empêcher la PME d'être compétitive. Notons que les surcoûts de la SdF + SLI, bien visibles à court terme, sont compensés par le gain du coût du cycle de vie (LCC, voir § 10.4), réalisé et vérifié seulement en fin de vie du système.

Notre objectif est donc de combler le fossé existant entre SdF et maintenance, en mettant à la disposition des techniciens de maintenance des outils tels que l'AMDEC (voir § 4.5.3) et les arbres de défaillance (voir § 4.5.4), utilisables en groupes de travail mixtes concepteurs/utilisateurs.

❑ **Analyses prévisionnelles et analyses postdéfaillance.**

Les analyses prévisionnelles de défaillance réalisées en phase de conception s'appuient sur l'expertise, ou l'expérience acquise à partir des équipements en fonctionnement sur les sites industriels. Cette connaissance du comportement « réel » repose sur les analyses postdéfaillance. Elle est à relativiser en fonction de l'environnement et des conditions de fonctionnement.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

L'organisation des différentes formes de retours d'expérience (bases de données, fiches SAV, participation des utilisateurs, fiches d'analyses de pannes utilisateurs, etc.) est donc à la base des analyses prévisionnelles. Celles-ci sont d'autant plus efficaces qu'elles sont réalisées « en amont » (fin de conception traditionnelle) et par un groupe de travail de compétences « croisées » et complémentaires.

4.5.2 Un outil d'investigation simple : le diagramme d'Ishikawa des 5 M

Cet outil « de la qualité » a vocation à rechercher les causes potentielles d'un dysfonctionnement. Appliqué à la maintenance, il permet une investigation a priori menée à partir de cinq familles de causes de défaillance : les méthodes, la main-d'œuvre, les moyens d'exploitation, le milieu environnant et les matières d'œuvre. Il se prête bien à une recherche collective, menée par construction d'une arborescence construite de l'aval (le défaut) vers l'amont (les causes potentielles), suivant l'exemple de la figure 4.26.

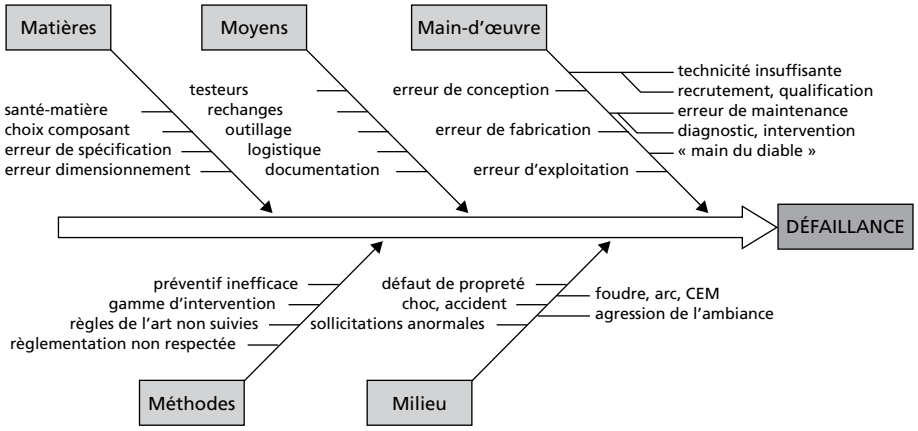


Figure 4.26 – Recherche des causes potentielles d'une défaillance

4.5.3 Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC)

❑ Définition et différentes formes évolutives

□ Définition

L'AMDEC est une méthode qualitative et inductive visant à identifier les risques de pannes potentielles contenues dans un avant-projet de produit ou de système, quelles que soient les technologies, de façon à les supprimer ou à les maîtriser *ab initio*. Elle est normalisée par l'AFNOR : norme X 60-510 de décembre 1986.

□ Histoire et évolution

La FME(C)A (*failure mode effect critically analysis*) a été mise au point vers 1960 dans l'industrie aéronautique américaine. Dédiée à l'origine à la mise au point des produits, l'industrie automobile a étendu son usage à la mise au point des procédés, puis des

systèmes de production vers 1980. De plus, alors que sa vocation initiale était prévisionnelle, l'outil a été utilisé de façon « opérationnelle » pour améliorer des systèmes existants.

Il est possible de réaliser des AMDE ou des AMDEC, l'estimation de la criticité des modes de défaillance apparaissant utile ou non. Actuellement, les AMDE (C) sont mises en œuvre :

– de façon réglementaire : sûreté des industries à risque (nucléaire, chimie, aérospatiale, transports, etc.) ;
– de façon contractuelle : équipementiers de l'automobile principalement ;
– de façon volontaire : construction d'une bonne disponibilité à l'origine ou amélioration de la disponibilité en phase d'exploitation.

Nous n'étudierons que les analyses de type « AMDEC-moyens de production » qui concernent le plus les techniciens de maintenance.

❑ Prérequis à l'AMDEC-moyen de production

☐ Les analyses AMDEC se font en groupe de travail

Le principe est de constituer un groupe de travail comprenant :

– les concepteurs qui ont établi l'avant-projet de l'équipement (partie opérative et/ou partie commande) et qui maîtrisent les modes de fonctionnement (fonctions de type φ_0) ;
– des techniciens utilisateurs ou mainteneurs chargés d'enrichir le projet de leur connaissance du terrain et des pathologies (pertes de fonction φ_1) susceptibles de se produire.

> **Remarque**
>
> Quand il s'agit d'AMDEC-produit, les commerciaux chargés de vendre ce produit ont leur place légitime dans le groupe.

L'efficacité du groupe de travail AMDEC, comme de tout groupe, dépend de l'application plus ou moins heureuse de la dynamique des groupes et de la conduite de réunion que nous n'aborderons pas ici. Donnons seulement le principe, tiré de (CHA 96, page 60) : « Liberté d'expression des participants, Égalité dans les propositions et les décisions, Fraternité pour réussir ensemble notre projet ».

☐ L'AMDEC fait suite à une analyse fonctionnelle

Le système à analyser doit être totalement défini : environnement, réglementation, fonctions et performances minimales requises. Les deux premières colonnes d'une feuille d'AMDEC reprennent la fin de l'analyse fonctionnelle du système à corriger : l'association des composants d'un sous-système avec leurs fonctions requises.

❑ Méthodologie de la réalisation d'une AMDEC-moyen de production

☐ Choix du sous-système à étudier et des objectifs à atteindre

Il s'agit au départ de choisir et de délimiter l'étude à mener, en fonction des objectifs fixés (atteindre une valeur de disponibilité donnée, ou seulement « déverminer » les plus gros problèmes potentiels) et du délai accordé.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Remarquons que l'AMDEC se prête à des « zooms » successifs : de l'ensemble des fonctions d'une pelle mécanique, on peut se limiter à l'étude des pertes de fonctions hydrauliques, puis à celle d'un sous-système donné, puis à celle d'un simple vérin !

□ Constitution du groupe de travail

Sa composition dépendra des expertises requises en fonction des technologies présentes. Il faudra également définir le mode de fonctionnement du groupe, et en particulier la fréquence, la durée des réunions et le délai.

□ Mise au point de la fiche d'analyse

Sur un tableur, il faut définir les « lignes » (les composants) et les « colonnes » nécessaires (AMDE ou AMDEC) réparties en quatre grandes familles : analyse fonctionnelle, analyse de défaillance potentielle, estimation de la criticité et mesures à appliquer. Prenons un exemple standard de feuille AMDEC (tableau 4.4).

Tableau 4.4 – Exemple de feuille d'AMDEC-moyen de production

Analyse fonctionnelle			Analyse de défaillance				Estimation de criticité				Mesures
Composant		Fonction	Mode de défaillance	Causes	Effet local	Effet système	Gravité	Occurrence	Non détection	Criticité (indice)	Mesures envisagées
Nom	Rep										
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

□ Analyse fonctionnelle

Colonnes 1 et 2

Les colonnes 1 et 2 se déduisent de l'analyse fonctionnelle préliminaire nécessaire à la conception du système. Elles reprennent la liste des sous-ensembles ou des composants du système étudié, avec leurs fonctions associées.

□ Analyse des défaillances potentielles

Colonne 3 : modes de défaillance

Elle se déduit de la colonne 2 par identification des dégradations et des pertes de fonction envisageables. 33 modes de défaillance génériques sont proposés dans la norme AFNOR X 60-510 (voir tableau 4.6).

Colonne 4 : causes de défaillance

Elle se déduit de la colonne 3; à un mode de défaillance peuvent être associées plusieurs causes.

Colonnes 5 et 6 : effets de la défaillance

Elles se déduisent de la colonne 3, les effets étant envisagés localement au niveau du sous-système étudié (colonne 5), et globalement comme conséquences possibles sur la mission du système et sa sécurité (colonne 6).

☐ **Analyse de la criticité de chaque mode de défaillance**

Colonnes 7, 8 et 9

– *G* est l'indice de gravité. Il s'évalue à partir des effets (colonne 6) par une note estimée de 1 (mineur) à 5 (catastrophique). Suivant les systèmes, la gravité «relative» peut s'estimer sur plusieurs critères : sécurité des personnes, des biens, défauts de qualité, perte de disponibilité, pénalisation de la production, etc.

– *O* est l'indice d'occurrence. Il s'évalue à partir des probabilités des causes (colonne 4) par une note estimée de 1 (improbable) à 5 (fréquent). Il est parfois possible de faire correspondre ces indices à des valeurs chiffrées. Par exemple, estimer *O* en fonction du taux de défaillance λ exprimé en panne/heure suivant le tableau 4.5.

– *D* est l'indice de non-détectabilité. Il s'évalue à partir du mode de défaillance (colonne 3) par une note estimée allant de 1 (la dégradation « qui prévient ») à 4 (défaillance soudaine).

Tableau 4.5 – Indices d'occurrence

Valeur du taux de défaillance λ en panne/heure	$\lambda < 10^{-6}$	$10^{-6} < \lambda < 10^{-5}$	$10^{-5} < \lambda < 10^{-4}$	$10^{-4} < \lambda < 10^{-3}$	$\lambda > 10^{-3}$
Estimation de l'indice d'occurrence *O*	1	2	3	4	5
Appréciation qualitative	Improbable	Très rare	Assez rare	Peu fréquent	Fréquent

☐ **Hiérarchisation des problèmes**

Colonne 10 : estimation de I_c*, indice de criticité*

Chaque mode de défaillance identifié sera caractérisé par son indice de criticité :

$$I_c = G \times O \times D$$

Dans notre exemple, I_c sera compris entre $1 \times 1 \times 1 = 1$ et $5 \times 5 \times 4 = 100$. L'indice de criticité permet d'établir l'ordre de priorité des actions correctives à entreprendre.

Il tombe sous le sens que pour des défaillances apparaissant critiques ($I_c > 75$) une remise en cause de la conception est nécessaire. À l'opposé, il est possible de négliger certaines défaillances envisagées, mais qui ne sont ni probables ni graves ($I_c < 20$). Entre les deux, des mesures correctives doivent être proposées.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ Propositions d'améliorations

Colonne 11 : mesures envisagées

Elle est souvent décomposée suivant les rubriques possibles :

– modifications de conception,

– moyens de détection ou consignes de surveillance ou inspections périodiques,

– dispositif de remplacement, reconfiguration, repli,

– observations, recommandations.

Il appartient au groupe de travail de tirer le maximum de préconisations du travail long et fastidieux, mais riche d'enseignements qu'est une AMDEC – moyens de production.

❑ Les modes de défaillance génériques

La norme AFNOR X 60510 propose une liste de 33 modes de défaillance relatifs aux parties « commande », indiqués dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6

1	Défaillance structurelle (rupture)	19	Ne s'arrête pas
2	Blocage physique (ou coincement)	20	Ne démarre pas
3	Vibrations	21	Ne commute pas
4	Ne reste pas en position	22	Fonctionnement prématuré
5	Ne s'ouvre pas	23	Fonctionnement après le délai (retard)
6	Ne se ferme pas	24	Entrée erronée (augmentation)
7	Défaillance en position ouverte	25	Entrée erronée (diminution)
8	Défaillance en position fermée	26	Sortie erronée (augmentation)
9	Fuite interne	27	Sortie erronée (diminution)
10	Fuite externe	28	Perte de l'entrée
11	Dépasse la limite supérieure tolérée	29	Perte de la sortie
12	Est en dessous de la limite supérieure	30	Court-circuit (électrique)
13	Fonctionnement intempestif	31	Circuit ouvert (électrique)
14	Fonctionnement intermittent	32	Fuite (électrique)
15	Fonctionnement irrégulier	33	Autres conditions de défaillances exceptionnelles suivant les caractéristiques du système, les conditions de fonctionnement et les contraintes opérationnelles
16	Indication erronée		
17	Écoulement réduit		
18	Mise en marche erronée		

La figure 4.27 illustre les modes de défaillance générique les plus fréquents en analyse prévisionnelle d'automatisme.

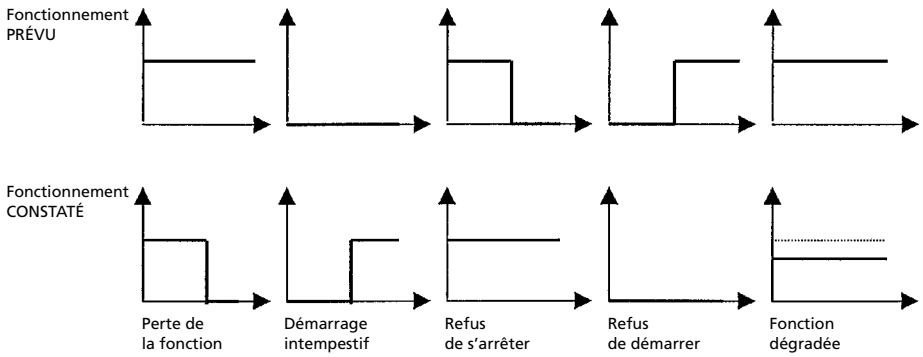


Figure 4.27

❑ **Autres exploitations possibles de l'AMDEC**

☐ **Détecter des causes communes de défaillance**

Lorsque nous voyons apparaître dans la colonne 4, face à plusieurs composants, une cause répétitive, il est souvent astucieux de la traiter collectivement, et non ligne par ligne (exemples fréquents : le gel, l'humidité, les vibrations).

De plus, ces causes communes peuvent rendre inefficaces les mises en redondance destinées à fiabiliser un système. Il est donc intéressant de les identifier assez tôt pour éviter les « pseudoredondances ».

☐ **Traiter les effets communs par un arbre de défaillance**

Lorsque nous voyons apparaître dans la colonne 6, face à plusieurs composants, un effet répétitif, il est conseillé de construire l'arbre de défaillance relatif à cet effet. Prenons l'exemple d'un système de levage : si les analyses du câble, du frein, de l'embrayage, de l'arbre de poulie, etc., montrent un risque de « chute de la charge », alors il faut passer à l'arbre des causes de cette défaillance.

☐ **Mettre en place de la maintenance conditionnelle**

Lorsqu'un indice de criticité est de la forme $I_c = G \times O \times D = 5 \times 5 \times 1$, alors nous sommes devant une défaillance grave et probable, mais détectable : autant de conditions réunies pour la prévenir par la maintenance conditionnelle (voir § 2.3.2).

4.5.4 Arbres de défaillances

❑ **Principe**

Cette méthode déductive (de l'effet vers ses causes) a pour objet la recherche de toutes les combinaisons de défaillances élémentaires pouvant aboutir à un événement redouté, parfois identifié par une AMDEC.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

À partir de cet « événement sommet », on construit une arborescence représentant l'enchaînement logique des « événements intermédiaires » jusqu'à la mise en cause des « événements élémentaires » (défaillance d'un composant). Cela par utilisation du symbolisme logique de l'algèbre de Boole.

Il est ainsi possible d'identifier toutes les défaillances élémentaires pouvant conduire à l'événement redouté, puis de quantifier celui-ci par son taux de défaillance λ obtenu à partir des taux de défaillance λ_i de chaque composant mis en cause.

❑ Représentation symbolique

☐ Principales portes logiques et tables de vérité

Porte OU (figure 4.28)

Le système S sera défaillant si les composants A ou B sont défaillants. C'est le modèle « série ».

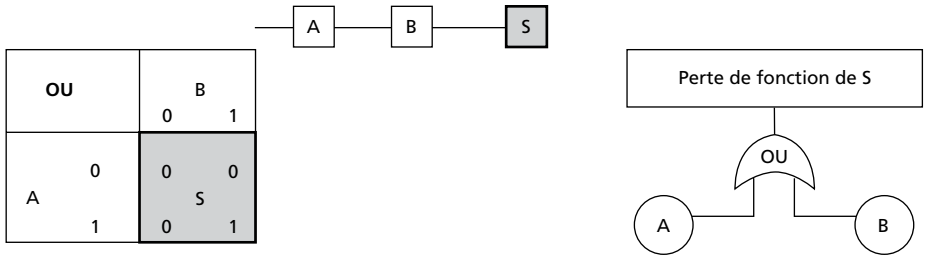


Figure 4.28

Attention

Ne pas confondre cette proposition avec : S fonctionne si A et B fonctionnent. La table de vérité n'est pas la même que pour les fonctions logiques d'automatisme !

Porte ET (figure 4.29)

Le système S sera défaillant si A et B sont défaillants (modèle « parallèle » dit redondant).

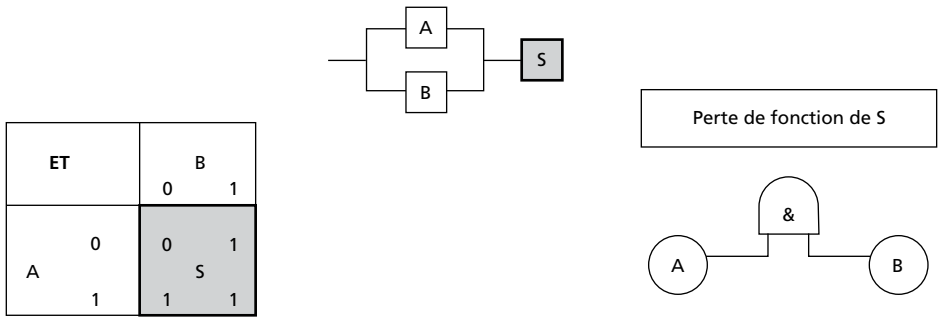


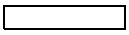
Figure 4.29

Remarque

Les portes ET et OU peuvent être associées à des conditions SI.

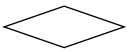
☐ **Représentation des événements de base**

Rectangle



Il représente un événement (sommet ou intermédiaire) résultant de la combinaison d'autres événements.

Losange



Il représente un événement non élémentaire dont les causes ne sont pas recherchées.

Cercle

Il représente un événement élémentaire, le plus souvent la défaillance d'un composant.

Application simple

La figure 4.30 représente l'arbre de défaillance relatif à la perte d'éclairage d'un poste de travail.

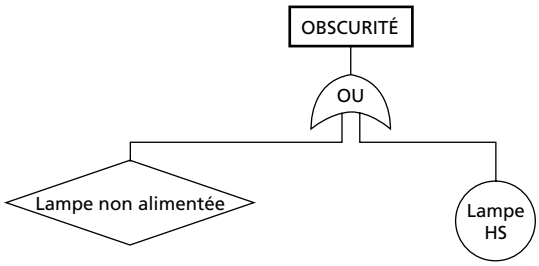


Figure 4.30

❑ **Exemple de quantification d'un arbre de défaillance**

☐ **Hypothèses préalables**

– On utilisera le taux de défaillance élémentaire λ_i, estimé pour chaque composant et supposé constant.
– Les événements élémentaires seront supposés indépendants.
– On se placera dans le cas des systèmes « non réparables » : la défaillance subsiste jusqu'à la fin de la mission sans intervention de la maintenance.

☐ **Principe de la détermination du taux de défaillance système λ**

Elle repose sur l'application de l'algèbre des probabilités.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– Porte ET : $\lambda = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 \ldots \lambda_n$

$$\lambda = \prod_{i=1}^{n} \lambda_i$$

– Porte OU : $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \ldots + \lambda_n$

$$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$$

□ **Exemple de quantification**

La figure 4.31 représente un exemple d'arbre de défaillance dont les taux de défaillance des quatre composants élémentaires sont connus.

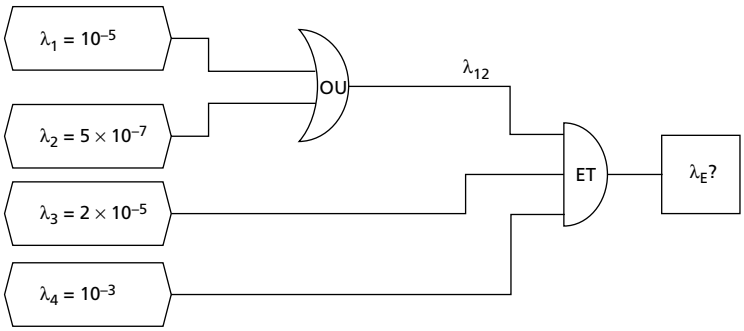


Figure 4.31

On calcule d'abord le taux de défaillance résultant de (1,2) liés par une condition OU :

$$\lambda_{12} = \lambda_1 + \lambda_2$$

$$\lambda_{12} = 10^{-5} + 5 \times 10^{-7}$$

$$\lambda_{12} \approx 10^{-5}$$

La puissance la plus faible est souvent négligée.

Calculons ensuite le taux de défaillance résultant :

$$\lambda_E = \lambda_{12} \times \lambda_3 \times \lambda_4$$

$$\lambda_E = 10^{-5} \times 2 \times 10^{-5} \times 10^{-3}$$

$$\lambda_E \approx 2\ (10^{-13}) \text{ valeur de négligeable}$$

Grâce à la redondance active d'ordre 2 (fonction ET à 3 portes), le système présente une très grande sécurité d'usage. Mais le triplement de composants ou de sous-ensembles a un coût. La réflexion économique liée à la redondance porte parfois sur le meilleur choix entre :

– un composant de haute fiabilité, déverminé pour prendre un exemple électronique ;
– deux composants de moins bonne fiabilité montés en redondance active.

Il faut alors étudier le meilleur ratio fiabilité/coût pour chaque alternative.

Dans le cas de systèmes réparables, l'arbre de défaillance devient dépendant du temps. Il est alors nécessaire de quantifier un taux de réparation μ caractérisant la maintenabilité. Associé au taux de défaillance, il permet de résoudre la quantification de l'arbre et d'obtenir la disponibilité prévisionnelle du système (voir § 5.4.4).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

5 • FIABILITÉ, MAINTENABILITÉ, DISPONIBILITÉ

5.1 Les analyses FMD des systèmes réparables

Nous plaçons délibérément ce chapitre sous le signe du « maintenancier » et non du « fiabiliste ». Ces deux métiers sont différents : le maintenancier est un gestionnaire des activités techniques du terrain, le fiabiliste est un scientifique concepteur de systèmes « sûrs » ou un exploitant des nombreux retours d'expérience mis en place dans quelques grands groupes industriels (automobiles, nucléaire, aéronautique, etc.).

Le premier a toujours trop de pannes, le second n'en a jamais assez dans son retour d'expérience. Le premier est spécialement concerné par la « disponibilité opérationnelle » des équipements, le second par la « fiabilité prévisionnelle » des composants et des systèmes.

Loin de les opposer, notre objectif consiste à combler le fossé qui les sépare trop souvent en mettant à la disposition du premier quelques outils du second. Des outils applicables sur le terrain industriel, leur approche théorique n'étant là que pour justifier le bien-fondé de leur mise en application.

5.1.1 Disponibilité des systèmes réparables et ses composantes

❑ **Définitions (CEN)**

☐ **Disponibilité**

« Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée. »

Remarques

1. Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance.
2. Les moyens extérieurs autres que la logistique de maintenance n'affectent pas la disponibilité du bien.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ Fiabilité

« Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné. »

> **Remarque**
>
> Le terme « fiabilité » est également utilisé pour désigner la valeur de la fiabilité et peut être défini comme une probabilité.

☐ Maintenabilité

« Dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. »

❑ Arborescence et caractéristiques FMD d'un système réparable

☐ Les trois niveaux de l'arborescence concernés par FMD

Les équipements industriels inventoriés sont tous des systèmes réputés « réparables » et, à ce titre, pris en responsabilité par la maintenance. Les trois niveaux de caractérisation FMD d'un équipement sont regroupés au tableau 5.1.

Tableau 5.1 – Niveau de caractérisation FMD d'un équipement

	Propriétés	Caractéristique FMD
Ensemble	Toujours réparable	Disponibilité
Module	Réparable ou consommable	Maintenabilité et fiabilité
Composant	Consommable, parfois réparable	Fiabilité

Y a-t-il des systèmes « non réparables » ? Ce sont les systèmes dits « monocoup » comme le sont certains systèmes de sécurité ou d'armes (missiles, torpilles, fusées, etc.) et les lanceurs spatiaux (Ariane).

☐ Le cas du « module » réparable

Le module est un sous-ensemble identifié (carte électronique, moteur, vérin, etc.) possédant la propriété d'être réparable, mais à un niveau où le technicien de maintenance doit se poser les questions successives :

– je répare le module défaillant (avec le risque d'indisponibilité forte) ou je le « consomme » par échange standard rapide ?

– si je le consomme, je le répare (en temps différé) ou je le rebute ?

Les caractéristiques de fiabilité et de maintenabilité du module sont les critères objectifs qui permettent de résoudre ces choix successifs. Les réponses sont de

nature économique, obtenues à partir de la simulation du coût de chaque scenario en prenant en compte les coûts directs d'intervention, les coûts induits liés à l'indisponibilité du système et le coût du magasinage des modules de rechange.

5.1.2 Analyses FMD : indicateurs opérationnels

❑ Temps de fiabilité, maintenabilité et disponibilité

□ Définitions

La figure 5.1 schématise les états successifs que peut prendre un système réparable.

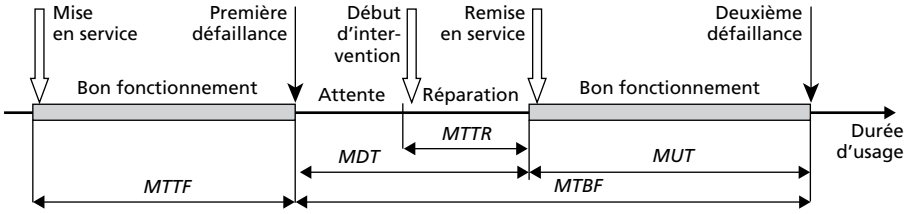


Figure 5.1 – Les durées caractéristiques de FMD

En fait, les grandeurs portées par le graphe sont des durées (*TBF*) auxquelles on fait correspondre des moyennes (*MTBF*) obtenues par exploitation statistique $m(t)$ ou probabiliste $E(t)$ des n durées constatées et enregistrées. Les sigles utilisés sont d'origine anglo-saxonne et correspondent aux notions suivantes :

– *MTTF (mean time to [first] failure)* : temps moyen avant première défaillance ;
– *MTBF (mean time between failure)* : temps moyen entre deux défaillances successives ;
– *MDT* ou *MTI (mean down time)* : temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre ;
– *MUT (mean up time)* : temps moyen de disponibilité ;
– *MTTR (mean time to repair)* : temps moyen de réparation.

□ Utilisation

Dans cette analyse, le système ne peut prendre que deux états : 0 = il n'est pas opérationnel, ou indisponible ; 1 = il est opérationnel, ou disponible.

Des analyses plus fines et plus complexes permettent d'intégrer un état intermédiaire nommé « mode dégradé », très utilisé en sûreté de fonctionnement. En maintenance, le choix d'un seuil d'admissibilité « s » permet de basculer de 1 à 0 face à une dégradation.

MTTF est utilisée dans les systèmes « monocoup » ou non réparables. Dans ce cas : *MTTF* = *MTBF*. Dans les systèmes réparables, *MTTF* est un indicateur de qualité. Le premier *TTF* est à intégrer à la collecte des *TBF*.

Nous proposons d'utiliser *MTA* (*moyenne des temps d'arrêt*) pour les temps d'arrêt relevés sous ce nom par la production. Et d'utiliser *MTI* (*moyenne des temps d'indisponibilité propre*) plutôt que *MDT* pour les temps d'arrêt de production imputable à la maintenance, l'équipement étant requis. *MTI* est important en gestion de la

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

maintenance, puisque c'est le temps qu'il faut relever pour estimer les coûts indirects d'indisponibilité.

Un cas fréquent se produit lorsque la $MTI = MDT << MUT$, il y a quasi-identité entre *MUT* et *MTBF*. Par exemple : 15 minutes d'indisponibilité moyenne tous les trois mois. Notons que la francisation « moyenne des temps de bon fonctionnement » s'applique mieux, en toute rigueur, à la *MUT* qu'à la *MTBF*.

La nature des *MTBF* et des *MTTR* est très différente : les *TBF* sont des temps d'activité machine, les *TTR* sont des temps d'activité humaine.

❑ Indicateurs de FMD

Chacun des concepts FMD est défini rigoureusement par une probabilité $F(t)$, $M(t)$ et $D(t)$ quantifiable que nous étudierons dans chacun des chapitres qui leur est consacré.

Des indicateurs (ou estimateurs, en statistique) permettent une évaluation opérationnelle de ces grandeurs à partir de paramètres simples relevés sur site. Ils seront plus ou moins rigoureux, donc plus ou moins significatifs.

□ Indicateurs de fiabilité

Ils sont classés ici du plus approximatif vers le plus rigoureux.

N : nombre de pannes : « ma voiture est souvent en panne, donc elle n'est pas fiable ».

λ : taux de défaillance moyen, exprimé en pannes/unité d'usage. Il est souvent supposé constant (hypothèse exponentielle dont la validité est toujours à vérifier). Dans ce cas, cet indicateur donne lieu à des analyses de fiabilité simples, objet du paragraphe 5.1.4, L'actuariat.

MTTF : moyenne des temps de bon fonctionnement jusqu'à la première défaillance, dont la date d'arrivée est peu significative de la suite.

MTBF calculée à partir d'une moyenne statistique d'un échantillon de *n* durées *TBF*.

$R(t)$: fonction fiabilité (*R* vient de l'anglais *reliability*). C'est la fiabilité « stricte » définie comme la probabilité de bon fonctionnement d'un système à l'instant *t*, déterminée comme précédemment à partir d'un modèle probabiliste ajusté à un échantillon.

MTBF calculée à partir de l'espérance mathématique de la variable aléatoire *TBF* en utilisant une loi de probabilité $R(t)$ ajustée à un échantillon de *n* valeurs de *TBF* relevées.

$\lambda(t)$: fonction taux de défaillance. Déduite de la fonction $R(t)$, c'est un bon indicateur du comportement d'un système.

Dans tous les cas, le niveau de signification de l'indicateur dépendra de deux facteurs initiaux :

– la taille *N* de l'échantillon collecté (d'où l'intérêt de regrouper des retours d'expérience comparables) ;

– la rigueur et la qualité du relevé des valeurs, qui passe par une compréhension et un consensus des opérateurs et dépanneurs chargés de ces relevés, ainsi que l'illustre par défaut la figure 5.2.

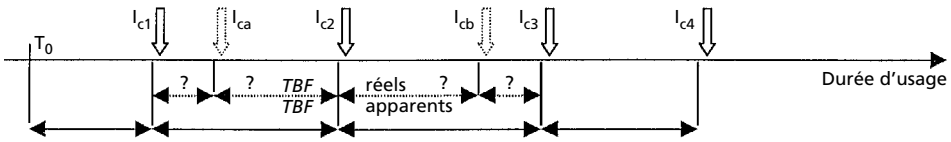


Figure 5.2 – La nécessaire rigueur des relevés, préliminaire à la fiabilité

I_{c1}, I_{c2} et I_{c3} sont normalement relevés. I_{ca} a été omise par l'équipe de nuit, I_{cb} n'est pas exploitable, car mal écrite ou notée sur un BT égaré. Il est évident que la *MTBF* déduite de ces valeurs apparentes sera très largement optimiste, quelle que soit la méthode de traitement utilisée. Cela n'est pas de la « fiabilité fiction » mais une réalité pour bien des services de maintenance ! Cette réalité mérite d'être corrigée avant d'envisager de passer à la MBF (maintenance basée sur la fiabilité, voir § 10.3).

□ Indicateurs de maintenabilité

MTTR est l'indicateur de maintenabilité. Elle peut être obtenue par la moyenne statistique d'un échantillon de *n* valeurs *TTR* ou par l'espérance mathématique de la variable *TTR* obtenue à partir d'un modèle probabiliste.

Notons que la durée d'intervention *TTR* n'est pas une donnée facile à acquérir, comme nous le montrons au paragraphe 6.2.2.

M(*t*) est la maintenabilité stricte. C'est la probabilité associée à un instant *T*, d'une remise en état de fonctionnement. Elle est déterminée à partir d'un modèle probabiliste.

□ Indicateurs de disponibilité

L'indicateur de base de la disponibilité opérationnelle est :

$$D_{op} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} < 1$$

Mais bien d'autres indicateurs peuvent être imaginés, plus ou moins rigoureux et choisis en fonction des données existantes. Quelques exemples :

$(T_O - T_A)/T_O$ avec T_O = temps d'ouverture et T_A le cumul des temps d'arrêt, ou des temps d'arrêt imputés à la seule maintenance ;

MTBF-MTTR est un indicateur de disponibilité propre, *MUT* est un indicateur de disponibilité effective ;

MTI est un indicateur d'indisponibilité propre.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ **Tableau de synthèse des analyses FMD**

Tableau 5.2 – Quelles sont les analyses FMD possibles ?

Arborescence d'un système	Caractéristique	Analyses correspondantes		
		***R*(*t*)**	***M*(*t*)**	***D*(*t*)**
Ensemble	Réparable Non réparable (monocoup)	*MTBF* *MTTF*	*MTTR* ×	D_{op} ×
Module interchangeable	Réparable Consommable	*MTBF* *MTTF*	*MTTR* ×	× ×
Composant	Consommable	*MTTF*	×	×

– Les analyses de *MTTF* et *MTBF* sont identiques : nous utiliserons la notation *MTBF* indistinctement.

– Les analyses de disponibilité ne sont significatives que pour des ensembles : il est cependant indispensable, dans le cas d'une ligne de production, de la décomposer en « tronçons » dont chaque disponibilité sera évaluée, puis recomposée pour évaluer la disponibilité opérationnelle de la ligne.

5.1.3 Estimation empirique de la fiabilité à partir du taux de défaillance λ

❑ **Forme et signification du taux de défaillance**

□ **Définition**

Le taux de défaillance, noté $\lambda(t)$, est un indicateur de fiabilité qui représente :

– soit un taux supposé constant de défaillances par unité d'usage exprimé sous la forme générale :

$$\frac{\text{nombre de défaillances}}{\text{durée d'usage}}$$

– soit la fonction $\lambda(t)$ qui représente une proportion de survivants à l'instant t, tirée d'un échantillon.

Le taux de défaillance s'exprime le plus souvent en « pannes par heure ».

□ **Défaillances intrinsèques et majeures**

Il est utile de préciser que, dans toute analyse de fiabilité, seules les défaillances « intrinsèques » doivent être prises en compte. Les pannes dues à des erreurs de

conduite (accident, consignes non respectées) ou à des événements extérieurs (incendie, inondation du local) doivent être exclues.

Une autre distinction initiale est nécessaire avant toute analyse : prend-on en compte les pannes mineures, et si oui, quel est le seuil entre le « mineur » négligé et le « majeur » intégré ? La réponse est donnée par le fait que la mauvaise disponibilité de beaucoup d'équipements est principalement due à de nombreuses petites pannes répétitives ou non. Si on néglige de les analyser, on va trouver une bonne pseudodisponibilité non significative de la réalité !

❑ La durée de vie d'un équipement : la courbe en baignoire

□ La courbe en baignoire

L'allure générale des variations de la fonction $\lambda(t)$ d'un équipement le long de sa durée de vie est connue a priori : nous trouvons une courbe en forme de « baignoire ». Cette courbe (figure 5.3) met en évidence trois périodes distinctes : la jeunesse, la maturité et la vieillesse de l'équipement, chaque période ayant ses types de défaillances propres…

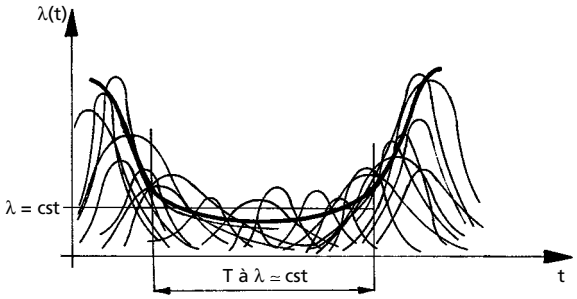


Figure 5.3 – Courbe en baignoire d'un système complexe

Pour un système comportant des technologies variées, la courbe $\lambda(t)$ peut être considérée comme une « ligne de tendance » résultante des différentes distributions des défaillances des composants. Cette courbe permet de séparer trois populations de défaillances de natures différentes, généralement classées en trois périodes successives (figures 5.4 et 5.5) :

– période de jeunesse, caractérisée par des défaillances « précoces » ;
– période de vie utile, avec des défaillances aléatoires et un taux de défaillance sensiblement constant. Nous nommerons « hypothèse exponentielle » le fait de considérer λ constant sur la période de vie utile ;
– période de vieillesse ou d'usure, avec un taux de défaillance inexorablement croissant jusqu'à l'obsolescence.

Remarque

Cette géométrie de courbe à un caractère « universel » : elle représente aussi bien des taux de défaillances « humaines » (taux de mortalité bien connue en démographie) que

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

des défaillances du règne végétal : plantez 3 000 pins et observez le devenir de chaque semis ; vous verrez apparaître les trois populations successives.

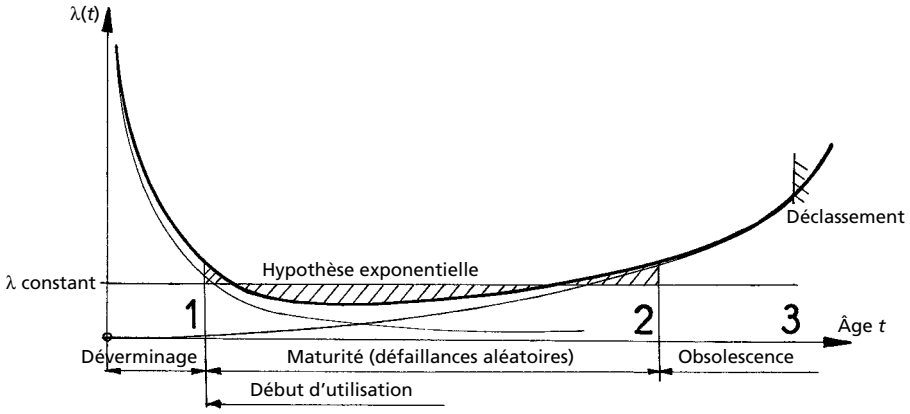


Figure 5.4 – Courbe de défaillance en baignoire pour des modules et composants du domaine *électronique*

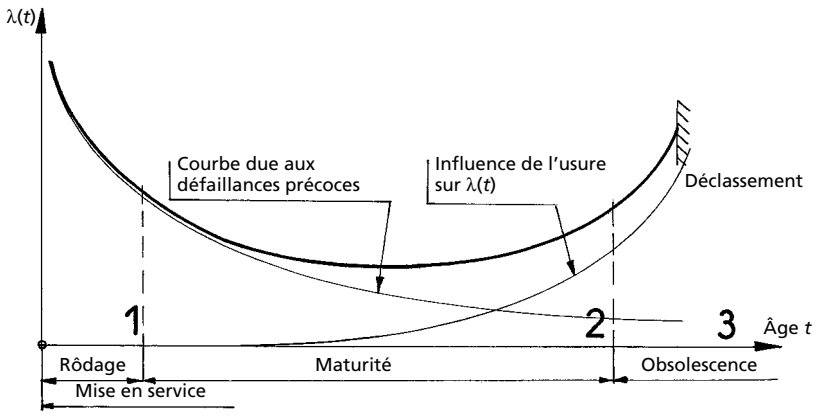


Figure 5.5 – Courbe de défaillance en baignoire pour des modules du domaine *électromécanique*

☐ Interprétations de la courbe en baignoire

Pour l'électronique, la phase de jeunesse est caractéristique de défauts initiaux de fabrication qu'il est possible de « couvrir » par des techniques de déverminage. Elles consistent à faire subir aux composants fabriqués (composant, circuit intégré ou carte) un « stress » suivant un programme d'agressions thermiques, vibratoires ou d'ambiance en fonction de leur profil d'utilisation. Sur 100 composants ainsi déverminés, puis testés, seuls les *n* résistants (donc dépourvus de défaut initial de fabrication) seront commercialisés.

La mise en service de ces n composants se fera donc en période aléatoire, pendant laquelle l'hypothèse exponentielle du taux constant est acceptable. Leur prévision comportementale sera donc possible en utilisant la loi exponentielle (voir § 5.3.1).

Pour l'électromécanique, la séparation des périodes est moins nette. L'hypothèse exponentielle étant mal ou non vérifiée, des modèles probabilistes tels que la loi de Weibull devront être utilisés pour analyser la fiabilité.

Remarquons cependant que la notion de rodage mécanique (lissage des aspérités à l'interface de deux pièces mobiles) correspond à la phase de « jeunesse », alors que l'émergence de certains modes de défaillances marque le début de la phase de « vieillesse ».

❑ Calculs du taux de défaillance

□ Analogie du taux de défaillance avec la vitesse

Commençons notre étude quantitative par une analogie avec le phénomène mécanique de vitesse. En fait le taux de défaillance représente la « vitesse d'arrivée des pannes ». Nous savons calculer une vitesse moyenne $\Delta x/\Delta t$, puis, faisant tendre Δt vers 0, une vitesse instantanée qui est la dérivée de l'espace par rapport au temps.

De la même manière, nous définirons un taux moyen de défaillance pendant un intervalle $(t, t + \Delta t)$, puis un taux instantané $\Delta t \to 0$.

Statistiquement, $\lambda(t)$ est une densité de probabilité conditionnelle de défaillance, qui caractérise la probabilité de défaillance dans l'intervalle Δt de dispositifs ayant survécu à l'instant t.

□ Calcul du taux de défaillance moyen

Cas 1 : les éléments défaillants sont remplacés

Nommons :

N_0 : nombre initial de dispositifs,

$N_s(t)$: nombre de survivants à l'instant t,

$N_s(t + \Delta t)$: nombre de survivants à l'instant $t + \Delta t$,

$C(\Delta t) = N_s(t) - N_s(t + \Delta t)$: nombre de défaillants pendant Δt.

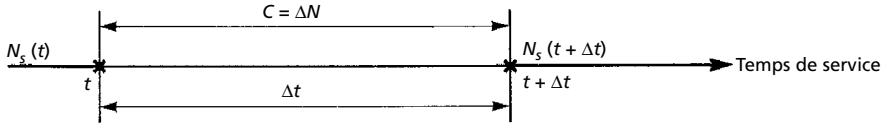


Figure 5.6

Dans ce cas, le lot de dispositifs est constant, donc $N_s(t) = N_0$. Le taux de défaillance moyen sur l'intervalle Δt est :

$$\lambda(t) = \frac{C(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}$$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Cas 2 : les éléments défaillants ne sont pas remplacés

Utilisons les mêmes symboles. Dans ce cas, $N_s(t)$ est différent de N_0, la fonction $N(t)$ étant décroissante. Le taux de défaillance moyen sur l'intervalle Δt est :

$$\lambda(t) = \frac{N_s(t) - N_s(t + \Delta t)}{N_s(t) \cdot \Delta t}$$

☐ Calcul du taux de défaillance instantané

Il s'applique aux seuls survivants à l'instant t et caractérise leur probabilité conditionnelle de défaillance dans l'intervalle $t + \mathrm{d}t$.

$$\lambda(t) = -\frac{\mathrm{d}N}{N(t)\mathrm{d}t} \quad \text{ou} \quad \lambda(t)\mathrm{d}t = -\frac{\mathrm{d}N}{N(t)}$$

Remarque

Le signe moins s'explique par la décroissance de $N(t)$.

☐ Applications

Cas des éléments défectueux remplacés ou réparés

Nous avons étudié 70 véhicules pendant la période allant de 80 000 à 90 000 km. 41 défaillances ont été réparées. Quel est le taux de défaillance relatif à cette période ?

$$\lambda(t) = \frac{C(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t} = \frac{41}{70 \times (90000 - 80000)} = 0{,}585 \times 10^{-4} \text{ pannes/km}$$

Cas des éléments défectueux non remplacés

On teste un lot de 50 électrovannes soumises en continu à 8 impulsions/minute. À la 50e heure, il en reste 33. À la 60e heure, il en reste 27. Quel est le taux de défaillance sur cette classe, par heure et par impulsion ?

$$\lambda(t) = \frac{N_s(t) - N_s(t + \Delta t)}{N_s(t) \cdot \Delta t} = \frac{33 - 27}{33 \times 10} = 18 \times 10^{-3} \text{ déf/heure}$$

ou $$\lambda(t) = 3{,}79 \times 10^{-5} \text{ déf/impulsion}$$

Si l'on avait remplacé les électrovannes défaillantes, λ serait :

$$\lambda(t) = \frac{6}{50 \times 10} = 12 \times 10^{-3} \text{ déf/heure}$$

5.1.4 Réalisation d'un actuariat de défaillances

❑ Définition et utilisation de l'actuariat

Un actuariat permet d'évaluer les lois de comportement d'un parc matériel standardisé : nombreux équipements identiques ou comparables mis en service de façon étalée dans le temps. Par exemple, une flotte d'autocars, un parc de machines-outils ou un lot de pompes centrifuges.

Une condition nécessaire est de posséder l'historique (n défaillances) de chaque équipement. Son intérêt est de pouvoir cumuler les expériences afin de posséder un échantillon de taille significative $N = \Sigma n$. L'actuariat permet de tracer la courbe en baignoire caractéristique du parc, et d'en estimer la fiabilité.

❑ Méthodologie de l'étude

□ Données de départ

Soient A, B, C, D des équipements identiques.

t_e : date de l'étude « actuariat »

t_0 : date de chaque mise en service

t_i : date d'une intervention corrective

t_d : date du déclassement éventuel de l'équipement

Traçons leur graphe de vie en reportant les défaillances sur le référentiel relatif à chaque équipement (figure 5.7).

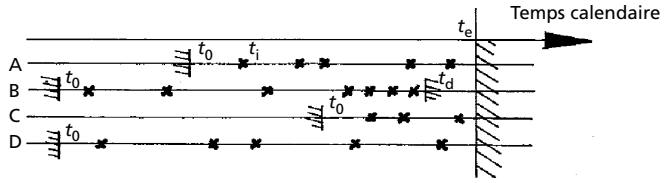


Figure 5.7

□ Initialisation

Il faut initialiser leurs mises en service à $t_0 = 0$ et individualiser leur temps de fonctionnement, de façon à obtenir le graphe de comparaison de la figure 5.8.

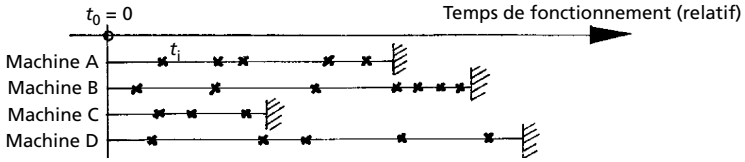


Figure 5.8

□ Choix des classes

Si le nombre de défaillances N est supérieur à 50, ce qui est le cas le plus fréquent par nature de l'actuariat, on découpe le temps en k classes tel que $k = \sqrt{N}$ en choisissant des tranches d'âges pratiques.

Exemple

Nous avons 66 défaillances réparties entre 0 et 1 100 heures. Nous prendrons $k = 8$ classes de 150 heures chacune.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

□ **Tableau de recensement**

Pour chaque classe d'âge (1), on établit l'inventaire des machines en service (2), le cumul des heures de fonctionnement des machines survivantes (3), puis le recensement des défaillances sur la classe (4) (tableau 5.3).

Tableau 5.3 – Exemple de tableau de recensement

1 Classe	2 Nombre d'équipements	3 Cumul des temps de fonctionnement	4 Nombre de défaillances	5 Taux moyen λ de défaillances
0-150 h	...	...	...	...
150-300 h	...	...	...	...
300-450 h	9	$9 \times 150 = 1\,350$ h	11	$11/1\,350 = 3{,}1 \times 10^{-2}$
450-600 h	...	...	...	...

□ **Exploitation : la courbe en baignoire**

Le taux de défaillance moyen obtenu dans le tableau précédent est représenté constant sur la classe d'âge considérée, ce qui permet de tracer l'histogramme des défaillances et de visualiser la courbe en baignoire des variations de $\lambda(t)$.

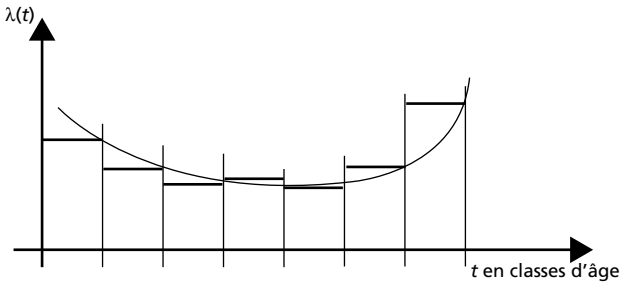


Figure 5.9

Remarque

Une étude de cas complète d'actuariat se trouve page 114 de l'ouvrage (MON 90).

5.1.5 Les analyses de fiabilité et de maintenabilité : la méthode statistique

❑ **Méthodologie de la recherche des lois de probabilité *R*(*t*) et *M*(*t*)**

□ **Nature des échantillons de valeurs**

Les valeurs à traiter sont des échantillons de *TBF* provenant d'un historique pour la fiabilité, ou des échantillons de *TTR* (durées d'interventions) provenant de BT (papiers ou écran) pour la maintenabilité. Ces échantillons, dans l'industrie, sont généralement de taille modeste : malheureusement pour le fiabiliste et le niveau de confiance de ses résultats, heureusement pour la maintenance.

Nous ne prendrons nos exemples que dans le traitement statistique d'historiques en recherche de fiabilité : les méthodes dégagées sont extrapolables aux études de maintenabilité, moins souvent réalisées…

L'historique (ou les essais de fiabilité) d'un dispositif fournit un échantillon de *N* valeurs de la variable aléatoire *TBF* sous la forme d'une série chronologique. Cet échantillon est une « image du passé » appartenant à une population mère constituée de toutes les défaillances passées et à venir, sur un dispositif donné. Remarquons que d'autres historiques établis à partir de dispositifs identiques exploités dans des conditions comparables fourniraient d'autres valeurs numériques : autant d'images différentes d'une même « population mère ».

L'objectif des analyses de fiabilité est de caractériser la population mère de défaillances aux fins de connaissance du comportement et de prévisions utiles à la maintenance. Cette caractérisation peut s'obtenir :

– soit à partir de la description statistique de l'échantillon ci celui-ci est significatif;

– soit par l'exploitation de modèles probabilistes déduits de l'échantillonnage.

□ Les deux méthodes de traitement d'échantillon de TBF

Nous proposons de décrire deux méthodes de traitement, schématisées à la figure 5.10.

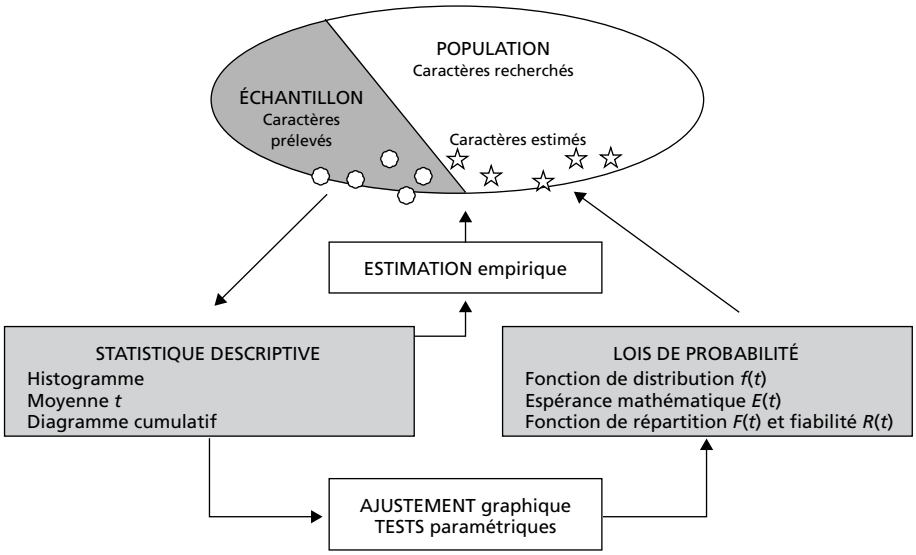


Figure 5.10 – Les méthodes d'estimations statistiques de la fiabilité d'un dispositif

– Pour les grands échantillons ($N > 50$, éventuellement > 30), mettre en œuvre une estimation statistique en application de la statistique « descriptive ». Cette méthode donnera des estimateurs « empiriques » de la fiabilité de l'échantillon : $R(i)$, *MTBF* et écart-type.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– Pour des échantillons petits ($8 < N < 50$), mettre en œuvre une recherche de loi de probabilité ajustable à l'échantillon. Cette méthode fournira les caractéristiques $R(t), F(t), f(t), \lambda(t), E(t) = MTBF$ de la population mère associée à un intervalle de confiance, sous forme graphique et/ou analytique.

❑ **Traitement statistique des grands échantillons**

☐ **Classement des données**

Les N durées de bon fonctionnement (intervalles entre pannes successives) sont classées par ordre croissant et regroupées en k classes. Puis on dénombre l'effectif sur chaque classe. De nombreuses théories régissent le choix des classes. Selon Chapouille et De Pazzis, nous prendrons $k = \sqrt{N}$ et $k > 5$.

Le tableau 5.4 montre la structure d'un tableau de valeurs, en prenant l'exemple d'un historique de 50 *TBF* relevées entre 0 et 5 100 h : nous prendrons $k = 7$ classes avec $\Delta t = 750$ h.

Tableau 5.4 – Tableau de valeurs pour réaliser un histogramme et évaluer la *MTBF*

N° des classes	Limite des classes	Centre de classe t_i	Fréquences absolues		Fréquences relatives $f_i = n_i/N$	Produit $f_i \cdot t_i$
			Effectif n_i	Cumulées Σn_i		
1	0; 749	375 h	2	2	2/50 = 0,04	15
2	750; 1 499	1 125 h	6	8	6/50 = 0,12	135
3	1 500; 2 249	1 875 h	14	22	14/50 = 0,28	525
4	2 250; 2 999	2 625 h	16	38	16/50 = 0,32	840
5	3 000; 3 749	3 375 h	7	45	7/50 = 0,14	472,5
6	3 750; 4 499	4 125 h	4	49	4/50 = 0,08	330
7	4 500; 5 249	4 875 h	1	50	1/50 = 0,02	97,5
			50		$\Sigma n_i/N = 1$	$\Sigma f_i \cdot t_i = 2\,415$ h

☐ **Statistique descriptive : histogramme et diagramme cumulatif**

On visualise les résultats du tableau en traçant :

– l'histogramme, dont la ligne polygonale passant par les centres de classes donne une allure de la distribution. La valeur modale est le centre de classe associé à la plus grande fréquence absolue trouvée ;

– le diagramme cumulatif (des fréquences relatives cumulées) se trace à partir des bornes supérieures des classes et donne l'allure de la répartition, le diagramme inverse donne l'allure de la courbe de fiabilité. La médiane se trouve à l'ordonnée 0,5.

□ Estimateurs empiriques

L'indicateur de fiabilité *MTBF* de l'échantillon est obtenu directement dans le tableau 5.4.

Sa forme générale est :

$$\bar{t} = \frac{1}{N} \cdot \Sigma n_i \cdot t_i$$

ou $\Sigma f_i t_i$ dans le tableau 5.4 (*MTBF* de l'échantillon).

La variance associée est :

$$V = \sigma^2 = \frac{1}{N} \cdot \Sigma n_i (t_i - \bar{t})^2$$

Le coefficient de dispersion est :

$$c = \frac{\sigma}{t}$$

Il est possible de réaliser deux types d'estimation pour la *MTBF* de la population mère :

– soit par estimation ponctuelle,

– soit par estimation de l'intervalle de confiance (α_1, α_2) associé à un risque d'erreur prédéterminé (0,05 en général) tel que Prob ($\alpha_1 < \theta < \alpha_2$) = 0,95 (ou 0,90 ou 0,99).

L'intérêt de l'estimation par intervalle de confiance est d'indiquer le niveau de confiance du résultat trouvé, en fonction de la taille de l'échantillon, ce que l'estimation ponctuelle ne montre pas. Un exemple relatif à la loi exponentielle sera traité au paragraphe 5.3.1.

□ Estimation de la fiabilité *R(t)*

Il est nécessaire de compléter le tableau 5.4 par les deux colonnes F_i et R_i et on obtient le tableau 5.5.

Tableau 5.5 – Estimation empirique de la fiabilité

Intervalle de classe	Effectifs	Fréquence relative	Fréquence cumulée	Fiabilité estimée
$t, t + \Delta t$	n_i	$f_i = n_i/N$	$F_i = \Sigma n_i/N$	$R_i = 1 - F(i)$
1	2	0,04	0,04	0,96
2	6	0,12	0,16	0,84
…	…	…	…	…
6	4	0,08	0,92	0,08
7	1	0,02	1	0

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Les valeurs de la colonne « fiabilité estimée » permettent de tracer la courbe d'évolution de la fiabilité $R(i)$.

❑ **Le traitement pour la recherche des lois de probabilité (cas des petits échantillons)**

En fiabilité, les lois de probabilité étudiées dans cet ouvrage sont la loi exponentielle et la loi de Weibull. En maintenabilité sont utilisées la loi log-normale et la loi de Gumbel (ou loi des valeurs extrêmes).

Pour chaque loi, l'estimation de la fiabilité $R(t)$ peut se faire rapidement par des méthodes graphiques, à partir de « papiers fonctionnels », ou analytiquement.

□ **Structure des tableaux de valeurs**

Les N valeurs de durées de bon fonctionnement TBF obtenues en exploitation seront classées par valeurs croissantes selon un ordre i allant de $i = 1$ à $i = N$. L'ordre $i = n(t)$ représente la ième défaillance de l'échantillon.

$F(i)$ est la probabilité cumulative de défaillance sur $(0, t)$. Suivant la taille N de l'échantillon, il est recommandé d'estimer la fiabilité $R(i)$ par les approximations suivantes :

– si $N > 50$:

$$R(i) = 1 - \frac{i}{N}$$

pourcentage de dispositifs n'ayant pas subi de défaillance entre 0 et t ;

– si $50 > N > 20$, formule des rangs moyens :

$$R(i) = 1 - \frac{i}{N+1}$$

– si $20 > N$, formule des rangs médians :

$$R(i) = 1 - \frac{i - 0{,}3}{N + 0{,}4}$$

Le tableau 5.6 montre un exemple de traitement des données pour trois tailles d'échantillon. La même valeur $TBF = 652$ h est successivement traitée comme étant la 8e/10, puis /30 et /60.

Tableau 5.6 – Obtention de valeurs approximées de la fiabilité d'un échantillon de N valeurs

N	Ordre i	Valeurs TBF	$F(i)$ i/N	$F(i)$ approximée		Fiabilité $R(i) = 1 - F(i)$
				$i/(N+1)$	$(i - 0{,}3)/(N + 0{,}4)$	
10	8	652 h			7,7/10,4 = 0,740	0,260
30	8	652 h		8/31 = 0,258		0,742
60	8	652 h	8/60 = 0,133			0,867

Remarque

La justification de ces formules d'approximation sort du cadre de cet ouvrage (voir LIG 92, AFN 88). Elles corrigent le « biais » de l'estimateur i/N en représentant la moyenne (a) ou la médiane (b) des valeurs de F que l'on obtiendrait en répétant de nombreuses fois l'expérience à l'instant t de la ième défaillance.

□ Ajustements graphiques

Les ajustements graphiques se font sur des papiers à échelles fonctionnelles qui sont conçus pour linéariser la fonction de répartition $F(t)$ à partir du nuage de points $(t_i, F(i))$ représentatif des résultats obtenus en exploitation (figure 5.11).

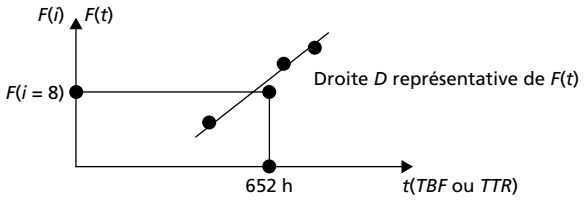


Figure 5.11

Les papiers fonctionnels permettent de déterminer les valeurs des 1 ou 2 ou 3 paramètres des lois recherchées, et donc de pouvoir appliquer ces lois représentatives de la population des défaillances passées et futures.

Nous avons sélectionné les quatre lois et les quatre papiers fonctionnels correspondants permettant à des agents des méthodes de maintenance (non à des spécialistes de la fiabilité) de traiter leurs historiques afin de déterminer les lois de fiabilité et de maintenabilité nécessaires à de bonnes prévisions de comportement des systèmes ou de certains composants « fragiles ».

1. Loi exponentielle à un paramètre λ : papier semi-logarithmique sur lequel sera tracée une droite dont la pente λ est l'inverse de la *MTBF*.
2. Loi normale à deux paramètres m et σ : papier « normal » sur lequel sera tracée la droite de Henry.
3. Loi des valeurs extrêmes : papier de Gumbel dont les deux paramètres a et u permettent d'obtenir la loi de maintenabilité et la *MTTR*.
4. Loi de Weibull à trois paramètres β, γ et η : papier d'Allan Plait, sur lequel la droite de Weibull permettra d'obtenir la loi de fiabilité ainsi que la *MTBF* de la population.

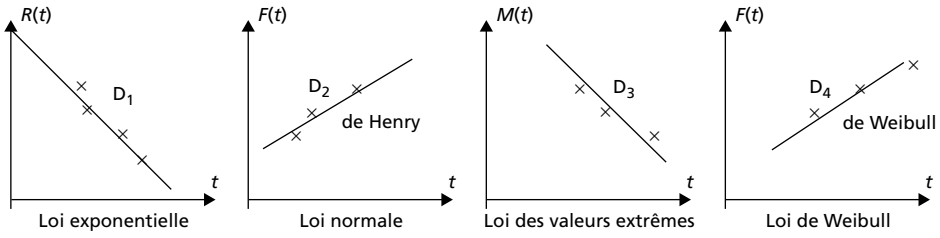


Figure 5.12 – Quatre exemples de papiers fonctionnels d'ajustement de lois de probabilité

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

La régression de ces nuages de points en une droite D permet d'affirmer, si le test paramétrique est positif : « si Dz existe, alors la loi z relative à la population peut s'appliquer ».

☐ Tests paramétriques

Ils ont pour rôle de vérifier qu'une loi de probabilité est applicable à un échantillon de valeurs, avec un risque α ou un niveau de confiance $1 - \alpha$. À chaque loi de probabilité correspond un ou plusieurs tests statistiques d'hypothèses, de corrélation ou de tendance appropriés. Les deux tests d'adéquation les plus courants en fiabilité sont le test du χ^2 pour les échantillons $N > 50$ et le test de Kolmogorov Smirnov pour les petits échantillons.

❑ Intérêt des analyses de fiabilité

Pour un équipement donné ou pour l'un de ses sous-ensembles, la connaissance de la loi de fiabilité $R(t)$ déduite d'un échantillon fini de valeurs représentatif d'une « réalité d'atelier » permet une exploitation prévisionnelle fructueuse en organisation de la maintenance.

Certaines applications demandent une analyse de fiabilité « système » (grand échantillon), d'autres s'appuient sur une analyse « composant » (petit échantillon le plus souvent). Prenons quelques exemples :

– l'optimisation des périodes d'intervention systématique est possible à partir de simulations économiques et de la connaissance du comportement d'un module ou d'un composant ;

– l'optimisation de la gestion des rechanges se fait à partir des lois de consommation qui coïncident avec les lois de défaillance ;

– l'évaluation du moment de fin de période aléatoire marque le début de l'émergence d'un mode de défaillance prédominant qu'il va falloir identifier et prévenir ;

– la « connaissance culturelle » de la notion de probabilité associée à la prévision et à la décision, de la courbe en baignoire des taux de défaillance et de la décroissance de la fiabilité permet à l'agent des méthodes d'acquérir une certaine maîtrise des événements fortuits de l'atelier. Même sans faire les calculs correspondants ;

– l'évaluation correcte des *MTTR* et des *MTBF* d'un équipement permet de mieux le gérer suivant l'indicateur « disponibilité » ;

– le cumul de toutes ces analyses permet de générer une « base de données interne » qu'il est ensuite possible de regrouper ou de comparer avec d'autres bases de données de fiabilité et de maintenabilité. Il devient également possible de « retourner les expériences de terrain » vers le service « travaux neufs » ou vers le fournisseur en partenariat ;

– la MBF (maintenance basée sur la fiabilité), comme son nom l'indique, ne peut se mettre en place qu'à partir de la connaissance du comportement d'un équipement.

Remarquons que la confrontation de ces analyses de fiabilité avec les analyses qualitatives de défaillances correspondantes est indispensable pour optimiser la maintenance d'un équipement.

5.2 La fiabilité : introduction et expressions mathématiques

5.2.1 Approche qualitative de la fiabilité

❑ Définition probabiliste de la fiabilité et commentaires

□ Définition AFNOR

« La fiabilité est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation données et pour une période de temps déterminée. »

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné.

□ Commentaire sur les quatre concepts de la définition

1. Probabilité : c'est le rapport :

$$\frac{\text{nombre de cas favorables}}{\text{nombre de cas possibles}} < 1$$

dans l'hypothèse d'équiprobabilité.

On notera $R(t)$ la probabilité de bon fonctionnement à l'instant t. Le symbole R a pour origine le mot anglais *reliability.*

On notera $F(t)$ la fonction définie par $F(t) = 1 - R(t)$, probabilité complémentaire (ou événement contraire). Donc $F(t)$ est la probabilité de défaillance à l'instant t et $R(t) + F(t) = 1$.

2. Fonction requise : nous parlerons de « fonction requise » pour un composant, de « mission » ou « de service attendu » pour un système. La définition de la fonction requise implique la définition d'un seuil d'admissibilité au-delà duquel la fonction n'est plus remplie.
3. Conditions d'utilisation : définir les conditions d'usage revient à définir l'environnement du système et ses variations, ainsi que les contraintes mécaniques, chimiques, vibratoires, thermiques, etc. auxquelles il est soumis. Il est évident que le même matériel soumis à deux environnements différents n'aura pas la même fiabilité.
4. Période de temps : c'est la définition de la durée de mission T, mais à chaque instant t_i est associée une valeur de fiabilité $R(t_i)$ décroissante.

□ Illustration

Envisageons la préparation d'un moteur pour Les Vingt-Quatre Heures du Mans (compétition d'endurance). Qu'est-ce qu'un moteur fiable ? La réponse n'est jamais absolue, mais relative à un profil de mission, qui est dans ce cas :

1. la probabilité de terminer = fiabilité requise = 0,9 (exemple d'objectif),
2. à 195 km/h de moyenne (seuil minimal de la fonction requise),
3. de jour et de nuit, avec de la pluie, du vent, avec n ravitaillements,
4. au bout de 24 heures (durée de mission).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

La compétition automobile nous offre un bon modèle de la maîtrise de la fiabilité, car il n'y aurait plus beaucoup de voitures au Mans au bout de 26 heures, ni au bout de 3 heures pour un Grand Prix de F1.

❑ Fiabilité et qualité

Ces notions sont indissociables. Si la qualité est prise dans son sens général de « satisfaction du besoin des utilisateurs », il est évident que la fiabilité (ou la disponibilité) est un des éléments de la satisfaction de l'utilisateur : fiabilité = probabilité de bon fonctionnement. Si la qualité est prise dans le sens de « qualité initiale », nous pourrons dire que la qualité initiale garantit la conformité d'un produit à ses spécifications, alors que la fiabilité mesure son aptitude à y demeurer conforme au long de sa vie utile.

□ L'hypothèse de base de la maintenance

La maintenance n'accepte de prendre en responsabilité que des systèmes, modules ou composants ayant fait la preuve de leur bon fonctionnement initial, suivant des procédures de « recette » d'un équipement. Nous écrirons en fiabilité, t_0 étant la date de mise en service :

$$R(t_0) = 1$$

D'où trois propositions de bon sens :

– tout système maintenu a fait la preuve de son bon fonctionnement au moment de sa mise en service ;

– il n'y a pas de bonne fiabilité sans bonne qualité initiale ;

– la fiabilité est l'extension de la qualité initiale dans le temps.

□ Illustration : qu'est-ce que la fiabilité d'un palier mécanique ?

À partir d'un cahier des charges (fréquence de rotation N = 1 200 tr/min, charges supportées, conditions de lubrification) relatif à la conception d'une fonction « guidage en rotation ».

À partir du dessin de définition d'un palier lisse (géométries + côtes fonctionnelles + matériaux) représenté sur la figure 5.13.

À partir du contrôle qualité qui garantit la conformité de l'assemblage fabriqué à ses spécifications.

Un palier a été ainsi défini, fabriqué et contrôlé : quelle sera sa fiabilité ? La réponse passe par la connaissance du phénomène de dégradation auquel il sera inexorablement soumis : l'usure associée à tous ses facteurs d'influence.

– Fonction requise : guidage en rotation d'un arbre.

– Perte de fonction : par usure au-delà d'un seuil. Soit $t_m = TBF$ la durée de bon fonctionnement limitée par la « perte de fonction ». Cette perte de fonction se produira lorsque les « points d'interrogation » de la figure 5.13 auront atteint des seuils mesurés directement (contrôle du jeu fonctionnel, de la rugosité, de la cylindricité) ou indirectement (niveau de vibration, température, etc.).

– Caractérisation de la fiabilité : par l'indicateur *TBF* (si une expérience) ou *MTBF* (si échantillonnage) exprimé en heures de rotation ou en millions de tours. Si l'on dispose de 50 paliers identiques et que l'on se fixe une durée de mission de 8 000 heures, il suffit de dénombrer les 41 paliers survivants à 8 000 h pour exprimer $R(8\,000) = 0{,}82$. La détermination d'une loi de probabilité permettra de calculer $R(t_i)$ quel que soit t_i.
– Aspects de la maintenance liés :
  – surveillance : par l'observation et les mesures indirectes en marche (vibrations, température), par les mesures directes à l'arrêt (jeu, rugosité) ;
  – ronde : suivant la procédure de lubrification prédéfinie ;
  – préventive systématique : interchangeabilité de la bague d'usure avant t_m ;
  – préventive conditionnelle : déclenchée à partir d'un seuil d'alerte d'usure prédéterminé et mesuré ;
  – corrective : interchangeabilité de la bague au-delà du seuil d'usure et réfection éventuelle de l'arbre (rechargement ou échange standard) ;
  – améliorations : elles peuvent porter sur la mise en œuvre d'une lubrification plus efficace, sur le choix de matériaux mieux adaptés ou sur l'ajout de traitements thermiques ou de surface.
– Le point de vue du concepteur : pour un problème mécanique aussi simple et aussi classique, il est difficile pour un concepteur d'appréhender la fiabilité autrement que par empirisme. Mais que devient le « H7 g6 » bien connu au bout d'un an de fonctionnement ? Seuls des essais de fiabilité ou l'organisation de retours d'expérience permettent d'acquérir la maîtrise de ces phénomènes d'usure.

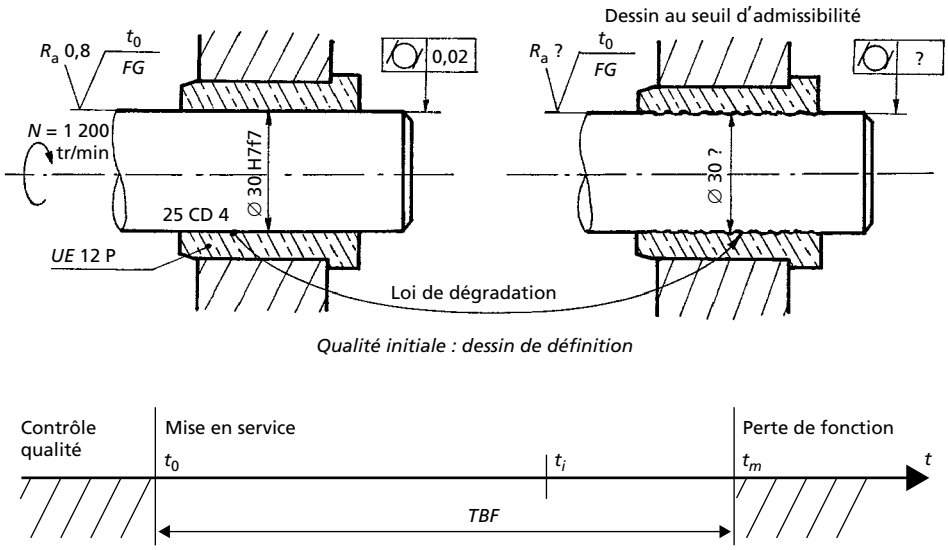


Figure 5.13 – Dégradation d'un palier : quelle est sa fiabilité à t_i ?

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

5.2.2 Expressions mathématiques de la fiabilité

❑ Fonctions de distribution et de répartition

□ Notion de variable aléatoire

On appelle variable aléatoire X une variable telle qu'à chaque valeur x de X on puisse associer une probabilité $F(x)$. Une variable aléatoire peut être :
– continue : intervalle de temps entre deux défaillances consécutives ;
– discrète : nombre de défaillances d'un composant sur un intervalle de temps.

□ Cas général d'une variable aléatoire continue

Soit une loi de probabilité relative à une variable aléatoire continue t. Elle est caractérisée par sa fonction de distribution, ou densité de probabilité $f(t)$ et par sa fonction de répartition $F(t)$ telles que :

$$f(t) = \frac{\mathrm{d}F(t)}{\mathrm{d}t} = \lim_{\mathrm{d}t \to \infty} \frac{\mathrm{Prob}(t < T < t + \mathrm{d}t)}{\mathrm{d}t}$$

La fonction de répartition $F(t)$ représente la probabilité qu'un événement (une défaillance) survienne à l'instant T dans l'intervalle $(0, t) \cdot F(t) = P\ (T < t)$.

□ Représentations graphiques de *f(t)* et *F(t)*

$$f(t)\mathrm{d}t = \mathrm{Prob}[t < T < t + \mathrm{d}t]$$

$f(t)$ est une densité de probabilité.

$$F(t) = \int_{-\infty}^{t_i} f(t)\mathrm{d}t = \mathrm{Prob}(T < t_i)$$

Si variable aléatoire discrète :

$$F(t_n) = \sum_{0}^{n} f(t_i) = \mathrm{Prob}(T < t_n)$$

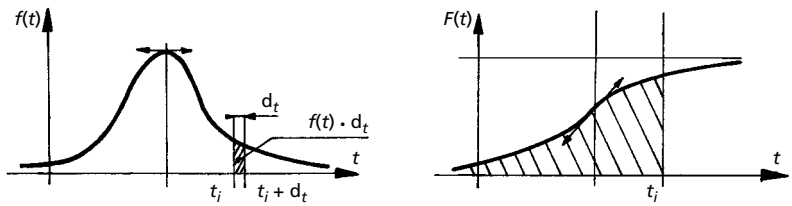


Figure 5.14 – Fonctions de densité de probabilité et de répartition

□ Application à la fiabilité

Un dispositif mis en marche pour la première fois à t_0 tombera inexorablement en panne à un instant T non connu a priori. T, date de la panne, est une variable aléatoire de fonction de répartition $F(t)$.

$F(t)$ est la probabilité d'une défaillance avant t_i.

$R(t)$ est la probabilité de bon fonctionnement à t_i. C'est une fonction monotone décroissante.

$R(t)$ et $F(t)$ sont des probabilités complémentaires, telles que :

$$R(t) + F(t) = 1$$

$$\int_0^t f(t)\mathrm{d}t + \int_t^\infty f(t)\mathrm{d}t = I$$

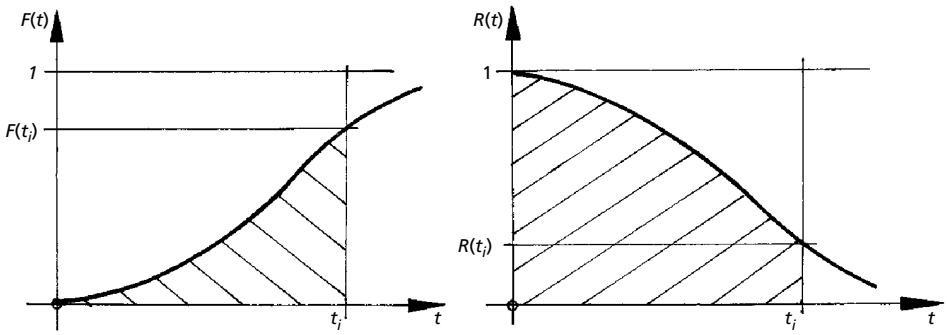


Figure 5.15 – Probabilités complémentaires $F(t)$ et $R(t)$

❑ Taux de défaillance

Soit N_0 le nombre de dispositifs fonctionnant à t_0,

$N(t)$ le nombre de dispositifs fonctionnant à l'instant t,

$N(t + \Delta t)$ le nombre de dispositifs fonctionnant à l'instant $t + \Delta t$.

$\dfrac{N(t)}{N_0}$ est un estimateur de la fiabilité R(t) :

$$N(t) - N(t + \Delta t) = \Delta N > 0$$

Signe moins car $N(t)$ décroît. À l'instant $t + \Delta t$, il reste :

$$N(t + \Delta t) - N(t) = -\Delta N$$

Si Δt tend vers 0, l'estimateur tend vers une limite qui est le taux de défaillance instantané :

$$\lambda(t)\mathrm{d}t = -\frac{\mathrm{d}N}{N(t)}$$

$\lambda(t)\mathrm{d}t$ est une probabilité conditionnelle de défaillance sur l'intervalle $(t, t + \mathrm{d}t)$, car elle ne s'applique qu'aux survivants à l'instant t.

Appliquons le théorème des probabilités conditionnelles :

$$P \text{ (d'avoir une panne entre } t \text{ et } \mathrm{d}t) = P \text{ (de survivre à } t) \cdot \lambda\,(t) \cdot \mathrm{d}t$$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

$$f(t) \cdot \mathrm{d}t = R(t) \cdot \lambda(t) \cdot \mathrm{d}t$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

❑ **Expression générale de la fiabilité**

Intégrons l'expression trouvée $\lambda(t)\mathrm{d}t = -\dfrac{\mathrm{d}N}{N(t)}$ entre 0 et t.

$$-\int_0^t \lambda(t)\mathrm{d}t = \ln N(t) + k$$

$$N(t) = k \cdot \mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t)\mathrm{d}t}$$

Pour $t = 0$, $N(t) = N_0$ d'où $k = N_0$.

$$N(t) = N_0 \cdot \mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t)\mathrm{d}t}$$

$$\frac{N(t)}{N_0} = \mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t)\mathrm{d}t}$$

$$\boxed{R(t) = \mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t)\mathrm{d}t}}$$

C'est la relation fondamentale de la fiabilité, que nous retrouverons adaptée à la loi exponentielle avec un paramètre λ et à la loi de Weibull avec trois paramètres (γ, β, η).

□ **Expression de la MTBF**

La durée moyenne entre deux défaillances est l'espérance mathématique de la variable aléatoire T, qui a pour expression :

$$MTBF = E(T) = \int_0^t t \cdot f(t)\mathrm{d}t$$

□ **Exemple : probabilité de réussite d'une mission**

Nous allons calculer la probabilité de réussite d'une mission de durée Δt après un temps T de bon fonctionnement. Nous la noterons :

$$R(\Delta t / T) = \frac{R(T + \Delta t)}{R(T)}$$

Soit une mission d'une durée de 100 h au bout d'une période de 1 500 h de fonctionnement :

$$R(T) = R(1\,500\ \mathrm{h}) = 0{,}367$$

$$R(T + \Delta t) = R(1\,600\ \mathrm{h}) = 0{,}349$$

Donc :

$$R(100/1\,500) = \frac{0{,}349}{0{,}367} = 0{,}95$$

Il y a donc 95 chances sur 100 que le système remplisse sa mission de 100 h au bout de 1 500 h de fonctionnement.

5.2.3 Lois de composition de la fiabilité : association de matériels

❑ Configurations « série, parallèle »

La fiabilité d'un système est évidemment conditionnée par la fiabilité de chacun de ses composants mais aussi par la façon dont ils sont structurés. Cette structure peut être modélisée par des « blocs-diagrammes » de fiabilité configurés en série ou en parallèle.

□ Configuration en série

S fonctionne si A et B… et N fonctionnent, mais S est défaillant si A *ou* B… *ou* N sont défaillants ! (Revoir les tables de vérité § 4.5.4.)

La configuration en série est caractéristique de l'association d'équipements en lignes de production. Dans ce cas, ce sont les disponibilités de chacun que nous composerons pour évaluer la disponibilité de la ligne (voir § 5.5).

Au niveau des sous-ensembles ou des composants d'un système, le modèle « série » est le plus fréquent. Il se caractérise par le fait « qu'il suffit qu'un composant soit défaillant pour que le système soit défaillant ». Ce qui se vérifie le long d'une chaîne cinématique, par exemple. Le modèle « série » n'est pas toujours immédiatement visible : soit un palier monté sur deux roulements, sont-ils en série ? Oui, puisque la défaillance de l'un d'entre eux entraîne la défaillance du palier.

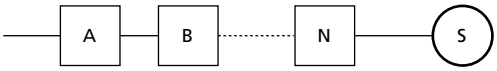


Figure 5.16

□ Configuration parallèle

S est défaillant si A et B (et N) sont simultanément défaillants.

La configuration parallèle est plus rare, puisqu'elle implique une redondance volontaire de deux ou de *n* éléments de telle façon que « la défaillance du système n'est obtenue que si tous les éléments sont simultanément défaillants ». Ce qui va dans le sens de la sûreté de fonctionnement du système.

Les redondances sont rares au niveau des équipements, car coûteuses en investissement (groupe électrogène de secours en parallèle avec l'alimentation électrique du réseau, par exemple), mais plus fréquentes au niveau des modules : redondance de deux automates avec un détecteur de discordance, ou de trois automates avec un « voteur » majoritaire 2/3.

Attention cependant aux pseudoredondances sous l'effet de « modes communs » de défaillances ! Les calculs suivants ne sont valables que dans le cas de « l'indépendance (des causes) des défaillances ».

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

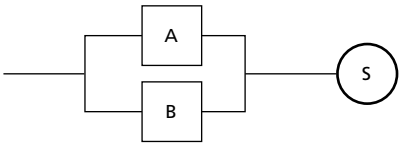


Figure 5.17

Le principe de toute redondance est de doubler ou de multiplier certains éléments pour assurer le maintien de la fonction (ou mission) du système face à une défaillance élémentaire. Un tel système est nommé *fault tolerant system*. Cette redondance peut prendre de nombreuses formes :

– matérielle ou logicielle ;
– homogène (éléments identiques) ou hétérogène (natures différentes des éléments) ;
– massive (système doublé) ou sélective (quelques composants multipliés) ;
– active (tous les éléments sont activés) ou passive (l'élément inactivé doit prendre le relais en cas de défaillance).

❑ Composition des fiabilités

Hypothèse commune : les défaillances doivent être indépendantes, au sens probabiliste du terme.

□ Cas du modèle série

Les probabilités composées donnent la formule suivante :

$$R_s(t) = R_A(t) \cdot R_B(t) \cdot \ldots R_n(t)$$

$$R_s(t) = \prod R_i(t)$$

Exemple

$$R_s = 0{,}9 \times 0{,}9 \times 0{,}9 = 0{,}729$$

Commentaire : notons l'exigence de très bonne fiabilité de chaque composant mis en série pour obtenir une bonne fiabilité du système. « L'allocation de fiabilité » consiste à partir de la fiabilité-système attendue pour déterminer chaque fiabilité élémentaire. La fiabilité-système ainsi « construite » à partir du choix de composants déterminés, de matériaux sélectionnés, de contrôles optimisés coûte cher ; la panne aussi…

Soit en système composé de 50 éléments tels que la panne d'un seul entraîne la perte de mission de l'ensemble. Si chacun a une fiabilité de 0,999 pendant la mission, la fiabilité du système sera :

$$(0{,}999)^{50} = 0{,}951$$

soit 4,9 % de risque de panne, ce qui n'est pas négligeable.

L'objectif « 0 panne », ambitieux et onéreux, est donc réservé à des domaines où les enjeux sont gigantesques (nucléaire, espace, aéronautique). Par contre, il est indis-

pensable de transférer une partie de ce savoir-faire « fiabiliste » vers le milieu industriel qui, avec moins de moyens, a aussi à satisfaire des exigences de disponibilité et de sécurité.

□ Cas du modèle parallèle

Il n'existe pas d'expression simple en dehors de la redondance active de deux éléments pour laquelle le théorème des probabilités totales donne :

$$R_s(t) = R_A(t) + R_B(t) - R_A(t) \cdot R_B(t)$$

Exemple

$$R_s = 0{,}9 + 0{,}9 - 0{,}81 = 0{,}99$$

Commentaire : la mise en redondance fiabilise un système, sous réserve que les éléments de la redondance ne soient pas soumis à des causes communes de défaillances. Le paragraphe 4.5.4 « Arbre de défaillances » donne un exemple de composition dans le cas particulier de la loi exponentielle.

Notons que certains circuits complexes ne peuvent pas se ramener aux modèles « série-parallèle ». Il faut alors faire appel aux techniques bayesiennes (du théorème de Bayes). La figure 5.18 montre un exemple de structure non réductible.

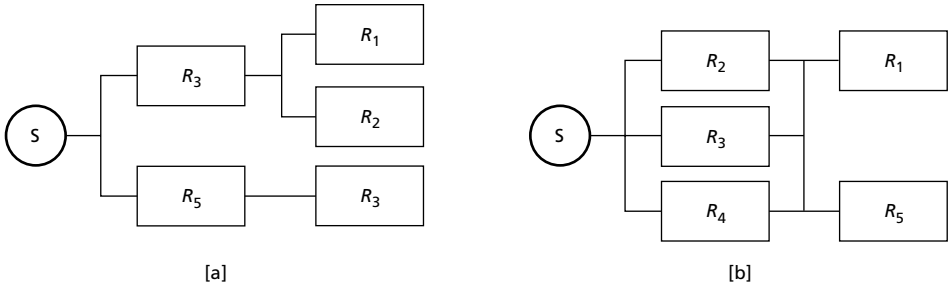


Figure 5.18 – (a) structure réductible;
(b) structure non réductible par les probabilités simples

□ Différentes formes de redondances

Il y a redondance dès qu'une fonction peut être assurée par deux ou plusieurs moyens. On distingue plusieurs formes de redondances :

– la redondance active est telle que tous les moyens fonctionnent simultanément;

– la redondance majoritaire est telle que certains moyens sont au repos, et qu'ils sont sollicités en cas de défaillance;

– la redondance majoritaire *m*/*n* est telle que la fonction est assurée si au moins *m* des *n* moyens sont en état de fonctionner. Prenons l'exemple de trois canaux redondants : un « voteur 2/3 » permet d'assurer la continuité de la fonction en alarmant la défaillance du canal (détection + localisation).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

5.2.4 Essais de fiabilité

Lorsque l'on désire évaluer la fiabilité d'un dispositif (module ou composant), on se trouve confronté au double problème du temps et de l'argent. D'où l'idée de mettre en œuvre des « essais de fiabilité » accélérés.

❑ Essais accélérés

Ces essais sont réalisés sur des effectifs faibles, mais en lot homogène, en utilisant des techniques faisant apparaître les défauts plus rapidement que lors des conditions normales d'exploitation.

□ Définition des critères d'essai

– La forme et la taille de l'échantillonnage : un lot (N) à étudier est décomposé en k échantillons de taille n.
– La durée de l'essai.
– Le niveau de confiance attendu.

Ces paramètres sont évidemment définis et souvent limités par le budget consacré à l'essai de fiabilité.

□ Définition des conditions d'essai

– Recherche des processus de dégradation et des zones sensibles à ces dégradations (exemple : zone d'usure ou de corrosion).
– Recherche des lois de dégradation (vitesse d'évolution de dégradation). L'évaluation du « facteur d'accélération » est complexe, car on n'applique jamais la totalité des contraintes.
– Les techniques d'accélération : les essais se font sous contraintes constantes ou échelonnées.

Contraintes constantes : le lot est décomposé en k échantillons. Différents niveaux de contraintes sont appliqués aux k échantillons, chacun étant soumis à un niveau de contraintes constant.

Contraintes échelonnées : on applique à chaque échantillon plusieurs niveaux d'une même contrainte.

□ Différentes formes d'essais

Ces essais peuvent se pratiquer sous forme :
– complète : les essais durent jusqu'à la défaillance du dernier composant ;
– tronquée : l'essai est arrêté à une date prédéterminée. Remarquons que l'exploitation statistique de ce cas rejoint l'exploitation statistique d'un historique arrêté à la date de l'étude, donc tronqué par nature ;
– censurée : l'essai est arrêté à un nombre prédéterminé de défaillances ;
– séquentielle : l'essai est arrêté lorsque la fiabilité estimée est supérieure à un seuil prédéterminé ;
– de mort soudaine, essai développé ci-dessous.

❑ **Essai par mort soudaine**

☐ **Principe**

L'essai par mort soudaine présente la particularité d'être rapide. Il consiste à partager un lot de N composants à évaluer en m groupes de p composants : $N = m \cdot p$. On enregistre le temps de la première défaillance de chaque groupe, et on arrête l'essai quand tous les groupes ont subi leur première défaillance. L'exploitation de l'essai se fait par la loi de Weibull, développée au paragraphe 5.3.2.

☐ **Exemple**

Soit un lot de 80 électrovannes partagé en 10 groupes de 8. L'essai permet d'enregistrer les temps relatifs aux 10 « *premières* d*éfaillances* » de chaque groupe, que l'on porte sur un papier de Weibull. On obtient ainsi la « droite de mort soudaine » des premières défaillances.

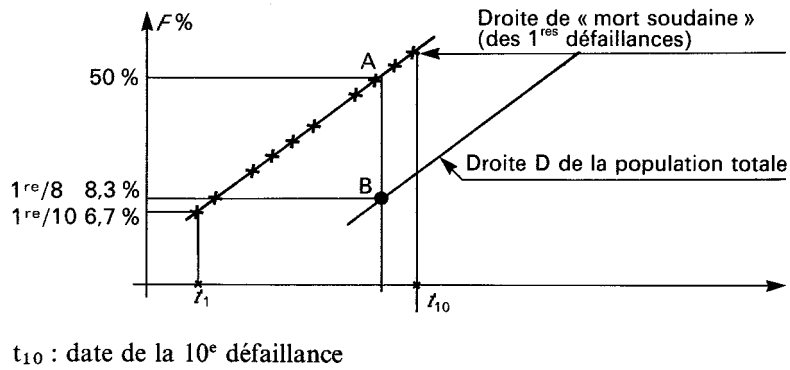


Figure 5.19 – Essai de fiabilité par mort soudaine

A représente la médiane de l'essai. B représente le rang médian de la première défaillance sur 8 (effectif du groupe essayé). La droite D, menée par B et parallèle à la droite de mort soudaine, est caractéristique de la population essayée. On déduira donc de cette droite la valeur des paramètres de Weibull, donc la loi de fiabilité $R(t)$ de l'échantillon.

5.3 La fiabilité : analyses par les lois de probabilité

5.3.1 Analyse de la fiabilité à partir du modèle exponentiel

❑ **Domaine d'utilisation de la loi exponentielle en fiabilité**

La courbe en baignoire de la figure 5.4, relative à la durée de vie d'un système, fait apparaître une période de maturité plus ou moins longue pendant laquelle le taux de défaillance d'un système ou d'un composant est sensiblement constant :

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

c'est le champ d'application de la loi exponentielle, qui repose sur l'hypothèse λ = constante.

Dans ce cas, les défaillances « aléatoires » émergent sous l'action de causes diverses et indépendantes – par opposition à la période suivante, dite « de vieillesse », pendant laquelle un ou plusieurs modes de défaillance prédominants apparaissent (fatigue, corrosion, etc.).

L'électronique se prête bien à l'utilisation de la loi exponentielle, dès lors que les composants sont déverminés. La plupart des analyses prévisionnelles de fiabilité et de maintenabilité reposent sur les hypothèses exponentielles :

λ taux de défaillance constant en fiabilité, donc $MTBF = 1/\lambda$;

μ taux de réparation constant en maintenabilité, donc $MTTR = 1/\mu$.

□ Origine : la loi de Poisson (loi discrète)

La réalisation d'événements aléatoires dans le temps se nomme « processus de Poisson ». Il caractérise une suite de défaillances équiprobables, indépendantes du temps et indépendantes entre elles. Dans ce cas, la probabilité de constater k pannes à l'instant t s'exprime par la loi de Poisson :

$$P(k) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$$

L'espérance mathématique est alors donnée par : $E(t) = m = \nu = \lambda t$. À l'instant t, la fiabilité est la probabilité pour qu'il n'y ait pas de panne à t. Elle s'écrit :

$$R(t) = P(k = 0) = e^{-\lambda t} \text{ (sachant que } a^0 = 1)$$

□ Loi exponentielle (loi continue) : caractéristiques

Elle se retrouve à partir de la loi fondamentale de la fiabilité avec λ constant. La probabilité de survie entre 0 et t devient :

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

– Densité de probabilité : $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$.

– Fonction de répartition : $F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ = probabilité de panne entre 0 et t.

– Espérance mathématique : $E(t) = 1/\lambda = MTBF$.

– Écart-type : $\sigma = 1/\lambda$.

– Durée de vie associée à un seuil de fiabilité : tirons t de la loi exponentielle :

$$-\lambda t = \ln R(t) \text{ soit } t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{R(t)}$$

Par exemple, pour un composant de $MTBF = 2\,000$ h et un seuil $R(t_j) = 0{,}9$, on aura $t_j = 0{,}105/\lambda = 0{,}105 \cdot MTBF$, d'où la valeur $t_i = 210$ h telle que 90 % des composants survivent.

❑ Représentations graphiques de la loi exponentielle

□ Anamorphose de la loi exponentielle

La représentation linéaire de la loi exponentielle s'obtient sur un simple papier semi-logarithmique. L'anamorphose permet une représentation linéaire de la fiabilité, la droite ayant pour pente $\lambda/2{,}3$.

En effet, si $R(t) = e^{-\lambda t}$,

$$\ln R(t) = -\lambda t \text{ en logarithmes népériens}$$

$$\text{ou } \log R(t) = -\frac{\lambda}{2{,}3} t \text{ en logarithmes décimaux.}$$

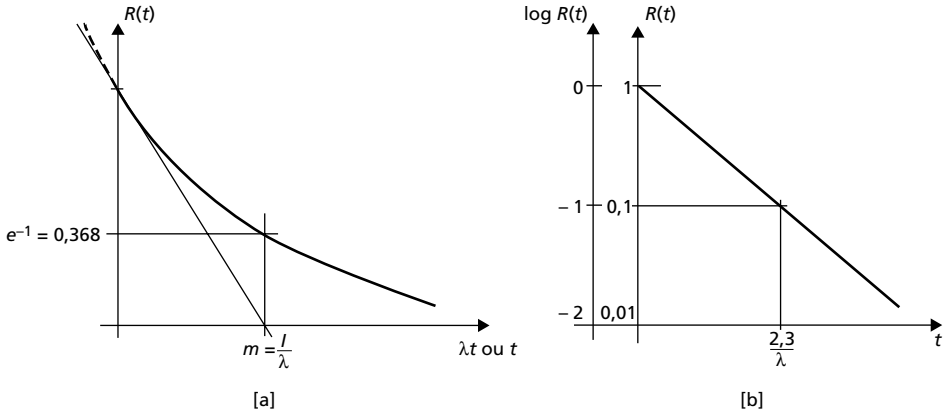


Figure 5.20 – Représentations graphiques de la loi exponentielle : (a) en échelles linéaires; (b) sur papier semi-logarithmique

□ Ajustement graphique : méthode d'estimation de λ

Portons sur le papier semi-logarithmique les N points formés des couples (t_i, F_i) extraits d'un tableau de valeurs du type du tableau 5.6. Traçons la droite D de régression des N points : si les points sont sensiblement alignés, alors la loi exponentielle s'applique. Notons que la régression peut se faire « au jugé » ou par une méthode de régression linéaire.

Déterminons la valeur du paramètre constant λ (par la pente de la courbe). Nous en déduisons la valeur de la $MTBF = 1/\lambda$ et l'équation de la loi exponentielle $R(t) = e^{-\lambda t}$, qui permet d'associer à chaque instant t_i du fonctionnement la probabilité de bon fonctionnement $R(t_i)$ sur la période de validité de la loi.

□ Estimation par intervalle de confiance

Il est parfois indispensable de « relativiser » l'écriture « $MTBF = 1\,827$ heures » par un encadrement de cette valeur dans un intervalle de confiance. En effet, la signification de ce résultat probabiliste est fonction de la taille N de l'échantillon et du niveau de confiance choisi (le plus souvent la valeur 0,9). Un exemple de détermination d'intervalle de confiance est donné dans (MON 90) à partir des abaques extraits de la norme X 06-501.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ **Application à la gestion des rechanges**

Soit un « module » à approvisionner en magasin comme pièce de rechange, dont nous avons déterminé la *MTBF* par le modèle exponentiel. Sa consommation dépend de la maintenance préventive programmée (consommation connue) et de la maintenance corrective (actions de fréquences aléatoires).

Dans le cas de la seule maintenance corrective, le problème est de calculer le nombre r de modules de rechange au point de commande, de façon à éviter la rupture de stock avec un risque admis de 5 à 10 % en général. Nous adopterons les notations suivantes :

T : durée maximale d'approvisionnement, à partir du point de commande ;

taux de défaillance constant :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

i : variable « nombre de défaillances » = nombre de modules consommés ;

r : nombre maximal de défaillances pendant T, associé au risque $1 - P = 10\ \%$;

P : probabilité de non-rupture = probabilité qu'il n'y ait pas plus de r défaillances pendant T :

$$P(r) = \sum_{i=0}^{r} \frac{e^{-\lambda T}(\lambda T)^i}{i!}$$

Une table de la loi de Poisson permet de calculer le nombre r de modules de rechange. Appliquons la loi de Poisson à deux exemples numériques, un sous-ensemble A ($MTBF = 5\,000$ h) et une pièce a ($MTBF = 12\,500$ h). Si la période d'approvisionnement est $T = 800$ h, le tableau 5.7 nous donne le nombre r de rechanges à stocker.

Tableau 5.7

Module	*MTBF*	λ	λT	*r*
Sous-ensemble A	5 000 h	2×10^{-4}	0,16	2
Pièce a	12 500 h	8×10^{-5}	0,06	1

L'utilisation d'abaques donnant directement le nombre de rechanges nécessaire sera expliquée au paragraphe 7.3.3.

5.3.2 Analyse de la fiabilité à partir du modèle de Weibull

❑ **Domaine d'utilisation et polymorphisme de la loi de Weibull**

☐ **Domaine d'utilisation de la loi de Weibull**

La loi de Weibull à trois paramètres est très « souple », ce qui lui permet de s'ajuster à un grand nombre d'échantillons prélevés au long de la vie d'un équipement. Elle couvre les cas de taux de défaillance variables, décroissants (période de jeunesse) ou croissants (période de vieillesse).

Son exploitation fournit :

– une estimation de la *MTBF* de la population de défaillances ;
– les équations de $R(t)$ et de $\lambda(t)$, ainsi que leurs variations sous forme graphique ;
– mais aussi le paramètre de forme β qui peut orienter un diagnostic, sa valeur étant caractéristique de certains modes de défaillance.

□ **Polymorphisme de la loi de Weibull**

Les graphes de la fonction de distribution $f(t)$ et du taux de défaillance $\lambda(t)$ de la figure 5.21 illustrent ce polymorphisme sous la seule influence du paramètre de forme β.

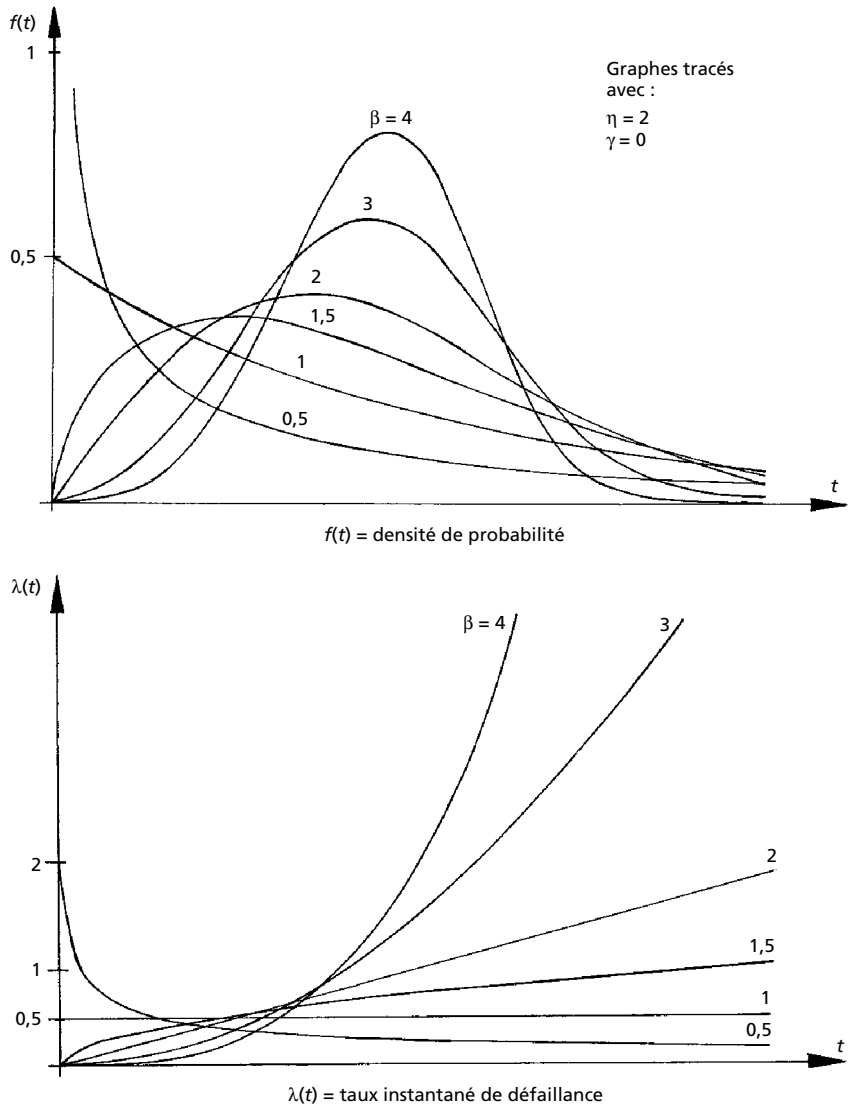


Figure 5.21 – Variabilité de la loi de Weibull sous l'influence de β

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

β est appelé paramètre de forme ($\beta > 0$) : suivant que β est supérieur, égal ou inférieur à 1, la loi de Weibull correspond à un taux de défaillance instantané croissant, constant ou décroissant.

η est appelé paramètre d'échelle ($\eta > 0$) : parfois nommé « caractéristique de vie », c'est un simple paramètre de changement d'échelle de temps.

γ est appelé paramètre de position ($-\infty < \gamma < +\infty$) : il définit un changement d'origine dans l'échelle des temps. Par exemple, si $\gamma > 0$, il y a une survie totale (pas de défaillance) entre 0 et γ.

Une analyse de la signification « pratique » des paramètres sera donnée au paragraphe 5.3.3.

❑ Expressions mathématiques caractéristiques : relations de la loi de Weibull

□ Densité de probabilité *f*(*t*)

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{(\beta-1)} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \text{ avec } t \geq \gamma$$

□ Fonction de répartition *F*(*t*) et fiabilité *R*(*t*)

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$

La fiabilité correspondante est donc $R(t) = 1 - F(t)$:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$

Remarque

Pour $\gamma = 0$ et $\beta = 1$, on retrouve la distribution exponentielle, cas particulier de la loi de Weibull. Dans ce cas, $\lambda = \frac{1}{\eta} = \frac{1}{MTBF}$.

□ Expression du taux instantané de défaillance λ(t)

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{(\beta-1)}$$

avec $t \geq \gamma$, $\beta > 0$, $\eta > 0$.

☐ **Espérance mathématique (MTBF) et variance**

$$E(t) = \gamma + \eta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = MTBF$$

dans laquelle Γest le symbole d'une fonction eulérienne de seconde espèce.

$$v(t) = \eta^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \eta^2\left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right]^2$$

Notons que la recherche numérique de la $MTBF = A\eta + \gamma$ et de l'écart-type $\sigma = B\eta$ se fait à partir des valeurs du tableau 5.9.

☐ **Durée de vie associée à un seuil de fiabilité**

La loi $R(t)$ permet d'associer la fiabilité à tout instant de fonctionnement d'un équipement. Réciproquement, il peut être intéressant de savoir à quel instant la fiabilité atteindra un seuil prédéterminé. En particulier, pour les roulements à billes, la durée de vie nominale est définie comme la durée atteinte par 90 % d'un lot de roulements. On la nomme L_{10}, durée de vie associée à un seuil de fiabilité de 0,90.

Développement :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$

Prenons le logarithme népérien des deux membres :

$$\ln R(t) = -\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}$$

$$\left[\ln\frac{1}{R(t)}\right]^{\frac{1}{\beta}} = \frac{t-\gamma}{\eta}$$

d'où la formule générale :

$$t = \gamma + \eta\left[\ln\frac{1}{R(t)}\right]^{\frac{1}{\beta}}$$

et, en particulier, au seuil $R(t) = 0{,}9$:

$$L_{10} = \gamma + \eta\left[\ln\frac{1}{0{,}9}\right]^{\frac{1}{\beta}}$$

❑ **Structure du papier de Weibull**

☐ **Description du papier fonctionnel de Weibull**

Ce papier « log-log » porte quatre axes :

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– l'axe A est l'axe des temps sur lequel nous porterons les valeurs t_i de durées de bon fonctionnement ;

– l'axe B porte $F(t)$ sur lequel nous porterons les valeurs $F(i)$ calculées par approximation (rangs moyens ou médians). Nous estimerons la fiabilité en prenant le complément : $R(t) = 1 - F(t)$;

– l'axe a correspond à ln *t;*

– l'axe b correspond à ln ln $(1/1 - F(t))$. Cet axe permettra d'évaluer la valeur de β.

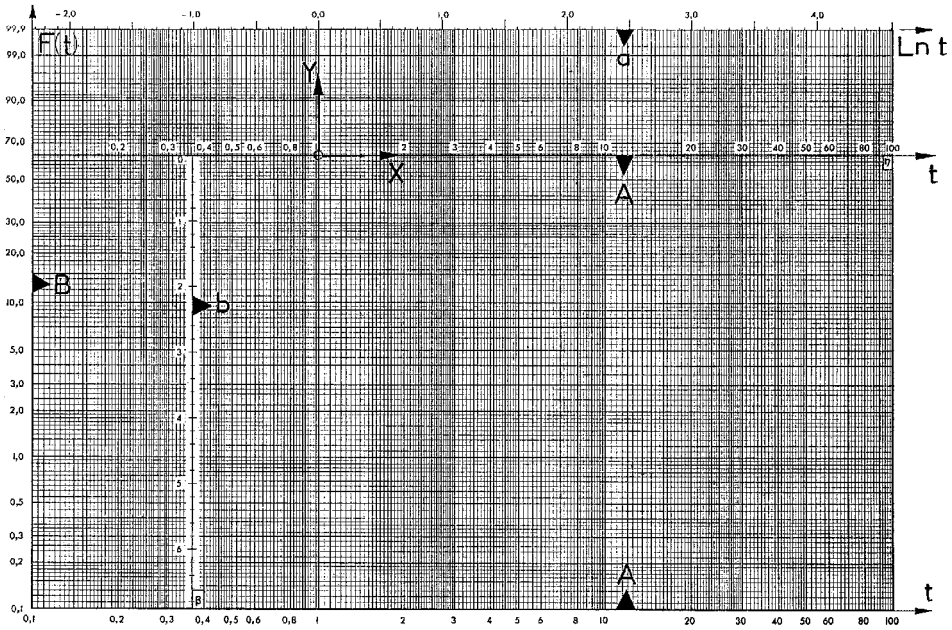


Figure 5.22 – Description du papier de Weibull

☐ **Justification mathématique de la structure du papier de Weibull**

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$

Nous pouvons prendre le log népérien des deux membres car $R(t) \leq 1$.

$$\frac{1}{R(t)} = \frac{1}{1 - F(t)} \geq 1$$

$$\ln\left(\frac{1}{1 - F(t)}\right) \geq 0$$

L'équation devient :

$$\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) = \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}$$

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right] = \beta \ln\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)$$

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right] = \beta \ln(t-\gamma) - \beta \ln \eta$$

qui est de la forme :

$$Y = \beta X + C$$

Nous obtenons une relation linéaire entre X et Y telle que la droite D_1 de régression du nuages de points (F_i, t_i) a pour pente le paramètre β.

Au point $t = \eta = 1$, origine du repère (X, Y), $\ln \eta = 0$, donc $C = 0$.

La droite D_2 parallèle à D_1 passant par l'origine de (X, Y) a pour équation $Y = \beta X$. Elle permet de déterminer la valeur de β sur l'axe b.

5.3.3 Modèle de Weibull : réalisation de l'ajustement graphique

❑ Méthodologie de l'analyse de fiabilité

1. Préparation des données.
2. Tracé du nuage de points (t_i, F_i).
3. Tracé de la droite dite « de Weibull » D_1.
4. Détermination des valeurs des trois paramètres β, η, γ.
5. Équation de la loi de Weibull (et représentation graphique éventuelle).
6. Détermination de la *MTBF* (et de l'intervalle de confiance éventuellement).
7. Exploitation des résultats.

❑ Application de la méthodologie à un cas simple

1. Préparation des données

Le tableau 5.6 a mis en évidence la structure générale d'un tableau de données en fonction de la taille N de l'échantillon. Prenons un exemple « mini » de 6 *TBF* (durées de bon fonctionnement d'un composant) traité avec la formule des rangs médians.

$$F(i) = \frac{i - 0{,}3}{N + 0{,}4}$$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Tableau 5.8

Ordre *i*	TBF	*F*(*i*)
1	165	0,7/6,4 = 0,11
2	330	0,26
3	515	0,42
4	740	0,58
5	915	0,73
6	1 320	0,89

2. Tracé du nuage de points

3. Tracé de la droite D_1 de Weibull

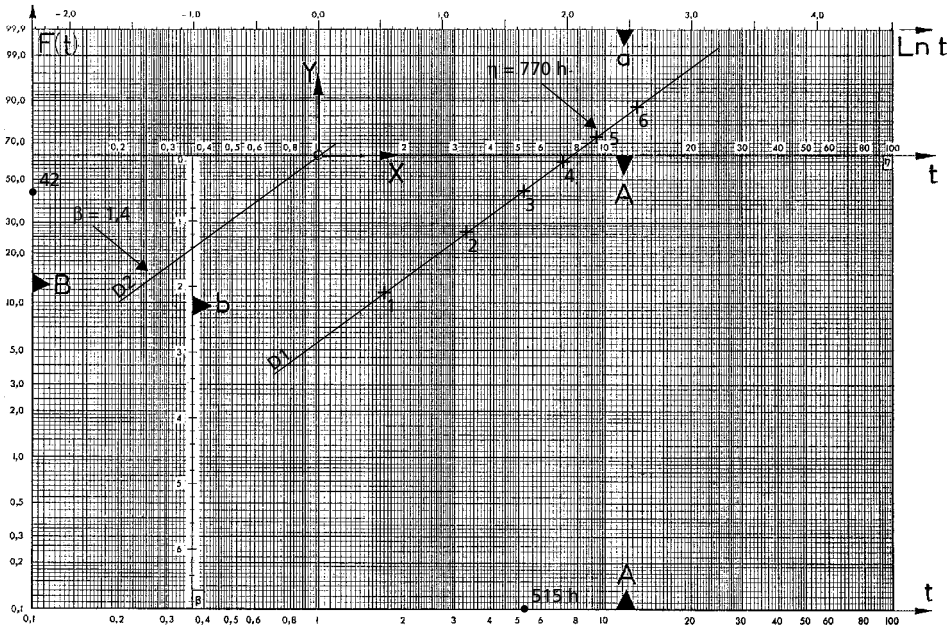


Figure 5.23

Le tracé du point 3 (t = 515 heures, $F(i)$ = 42 %) figure à côté des 5 autres points. La régression des 6 points « au jugé » se fait sans difficulté dans ce cas simple : nous obtenons la droite D_1.

4. Détermination des valeurs des trois paramètres :

– le fait d'avoir eu directement une droite D_1 sans redressement indique que $\gamma = 0$ (paramètre de position) ;

– menons la parallèle D_2 à D_1 passant par l'origine de (X, Y). D_2 coupe l'axe b en un point $\beta = 1{,}4$: c'est la valeur du paramètre de forme ;

– la droite D_1 coupe l'axe $t = \eta$ à l'abscisse $\eta = 770$ h : c'est le paramètre d'échelle.

5. Équation de la loi de Weibull

Il suffit de remplacer les trois paramètres constants dans l'équation générale $R(t)$ de Weibull pour avoir l'équation de la fiabilité du composant étudié.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{770}\right)^{1,4}}$$

Il est possible de trouver les expressions de $f(t)$, $F(t)$ et de $\lambda(t)$ à partir des trois paramètres, d'en visualiser les variations sur des graphes et d'associer à tout instant la probabilité de défaillance et le taux de défaillance instantané. L'étude de cas 5.3.5 montrera les différentes exploitations possibles.

6. Détermination de la MTBF *et de l'écart-type* σ

Le tableau 5.9 nous donne les valeurs des constantes A et B pour $\beta = 1{,}4$ (voir p. 180) : $A = 0{,}911$ et $B = 0{,}660$. Nous en déduisons la valeur de la $MTBF = A\eta + \gamma = 0{,}911 \times 770 = 700$ heures ; $\sigma = B\eta = 0{,}660 \times 770 = 508$ heures.

❑ Ajustement graphique : détermination des paramètres

Contrairement à notre exemple précédent volontairement « simple », les points expérimentaux portés sur le papier de Weibull sont souvent plus délicats à traiter et à interpréter.

□ Détermination de β et de η

La droite D_1 de régression coupe l'axe $A(t, \eta)$ à l'abscisse $t = \eta$ (justification : quand $Y = 0$, $\ln(t - \gamma) = \ln t = \ln \eta$ donc $t = \eta$).
β est la pente de D_1. Pour obtenir sa valeur, nous traçons la droite D_2 parallèle à D_1, passant par le point $\eta = 1$ (origine de X, Y). La droite D_2 coupe l'axe b en un point qui donne la valeur de β (justification : D_2 est la droite d'équation $Y = \beta X$ avec $X = \ln t$).

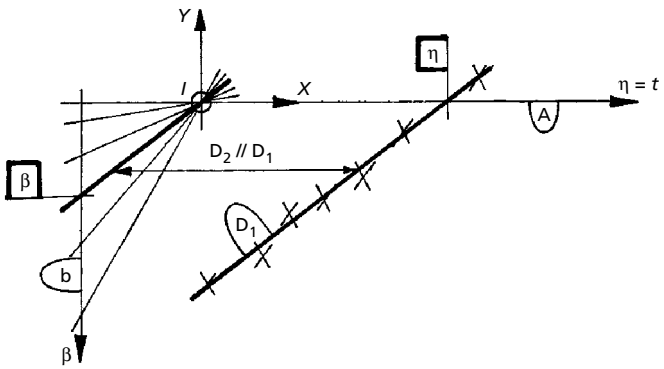


Figure 5.24

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Pour $t = I$, $\ln t = 0$ donc $X = Y = 0$.

Pour $\ln t = -1$ (sur l'échelle a), $Y = \beta \ln t = -\beta$.

Comme l'axe b portant β est orienté vers le bas, $Y = -b$ donc $b = \beta$.

□ Détermination de γ : les techniques de redressement

Si le nuage des points (t_i, F_i) fait apparaître une courbure convexe ou concave, alors le paramètre γ a une valeur non nulle à déterminer après avoir effectué un « redressement ». Ce redressement peut se faire « au jugé » ou par application d'une formule de redressement.

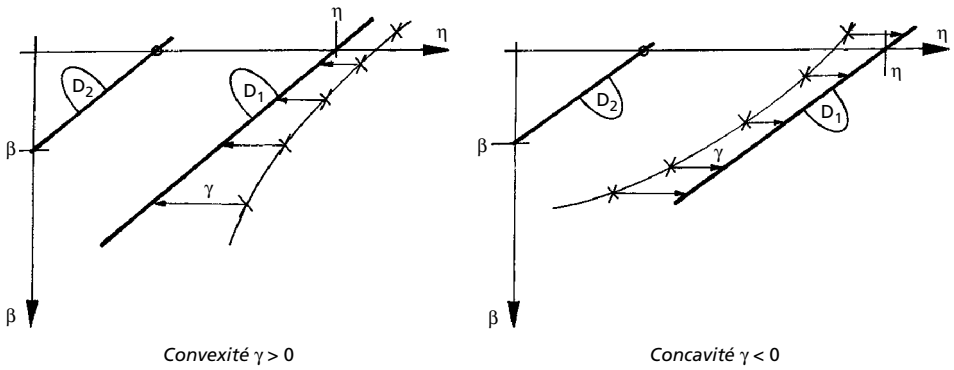


Figure 5.25

Redressement au jugé

Il faut translater tous les points d'une même valeur γ dont on augmente la valeur de proche en proche : la concavité (ou convexité) diminue progressivement jusqu'à l'obtention d'une droite : la valeur de translation finale est γ.

Redressement par la formule (*MON 90, p. 167*)

$$\gamma = \frac{t_2^2 - t_1 t_3}{2t_2 - t_1 - t_3}$$

Prenons trois points A_1, A_2 et A_3 sur la courbe C_1 tels que $(a_1, a_2) = (a_2, a_3) = \Delta$. Il est conseillé de prendre des points espacés mais non extrêmes. Nous lisons les valeurs t_1, t_2 et t_3 sur l'axe des t (axe A). Il reste à appliquer la formule ci-dessus pour trouver γ et pour tracer la droite D_1. L'intersection de D_1 avec l'axe η donne la valeur du paramètre η (figure 5.26).

Exemple

Soit un nuage de points, approximé par la courbe C_1. Choisissons A_1, A_2 et A_3. Nous lisons $t_1 = 2{,}5$, $t_2 = 3$, $t_3 = 4$,

$$\gamma = \frac{3^2 - 2{,}5 \times 4}{2 \times 3 - 2{,}5 - 4} = 2$$

D'où les trois paramètres de Weibull :

$$\gamma = 2,\ \eta = 2,\ \beta = 2{,}1$$

et l'équation de la fiabilité :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-2}{2}\right)^{2,1}}$$

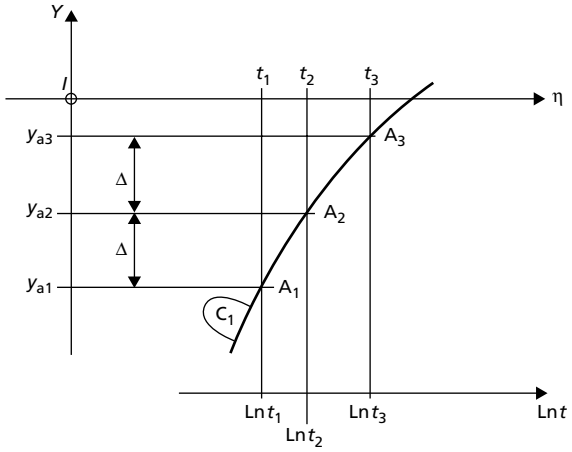


Figure 5.26 – Mode opératoire du redressement

❑ Signification des paramètres

□ Paramètre de forme β

C'est un paramètre sans dimension. Nous avons vu (figure 5.21) qu'il détermine la forme de la distribution $f(t)$ des défaillances d'un système et que sa valeur caractérise chacune des trois phases de la vie d'un système :

$\beta < 1$ phase de jeunesse avec défaillances de défauts de fabrication ou de montage ;

$\beta = 1$ phase de maturité avec défaillances aléatoires. Ce cas particulier correspond au taux de défaillance constant ;

$\beta > 1$ phase de vieillesse avec apparition d'un mode de défaillance prédominant caractérisé par β.

Le paramètre de forme peut aussi servir d'indicateur de diagnostic, certaines valeurs de β étant caractéristiques d'un mode de défaillance particulier.

Exemple

$1{,}1 < \beta < 1{,}6$ peut révéler un phénomène de fatigue. Il en est ainsi pour les roulements à billes dont la valeur normale est $\beta = 1{,}1$. Si β est plus fort, alors un mode de défaillance « anormal » (autre que la fatigue) est en cause.
Remarquons que pour $\beta = 3{,}6$ on retrouve une distribution « normale ».

Un cas particulier intéressant est celui des « populations mélangées » qui sont mises en évidence lorsque deux modes de défaillances différents se succèdent, le

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

second se superposant alors au premier, tel que l'illustre la figure 5.27. Nous devons alors séparer les deux droites de Weibull (une par population) et non redresser la concavité d'une courbe !

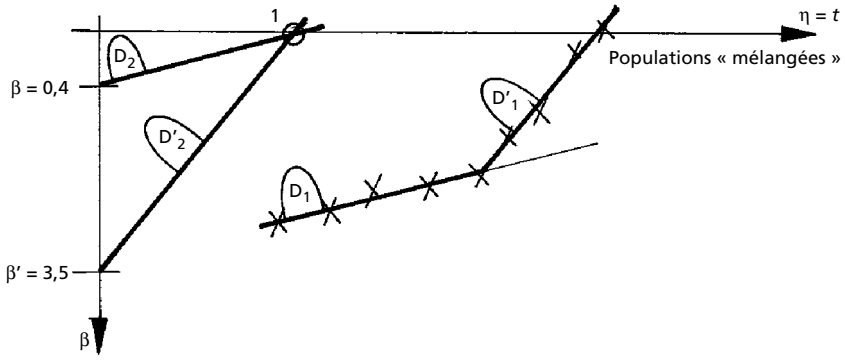


Figure 5.27 – Ajustement du nuage de points suivant deux droites

Nous pouvons penser, dans cet exemple, à des défaillances juvéniles dues à un mauvais montage ($\beta = 0{,}4$) suivies de défaillances par usure ($\beta = 3{,}5$).

☐ **Le paramètre d'échelle** η

Caractérisant le choix d'une échelle, il s'exprime dans la même unité de temps (heures ou cycles) que les *TBFi*. Si l'on trace la fonction de distribution $f_1(t)$ avec $\eta = 1$, la courbe $f_5(t)$ obtenue avec $\eta = 5$ sera divisée par 5 (en ordonnées), le temps t sera multiplié par 5 et l'aire de la distribution restera inchangée.

☐ **Le paramètre de localisation** γ

Également nommé paramètre de décalage ou de position, il s'exprime en unité de temps. Il indique la date de l'apparition du mode de défaillance caractérisé par β.

– Si $\gamma > 0$, il y a survie totale entre $t = 0$ et $t = \gamma$.
– Si $\gamma = 0$, les défaillances débutent à l'origine des temps.
– Si $\gamma < 0$, les défaillances ont débuté avant l'origine des temps relevés, ce qui montre que la mise en service de l'équipement étudié a précédé la mise en historique des *TBF*.

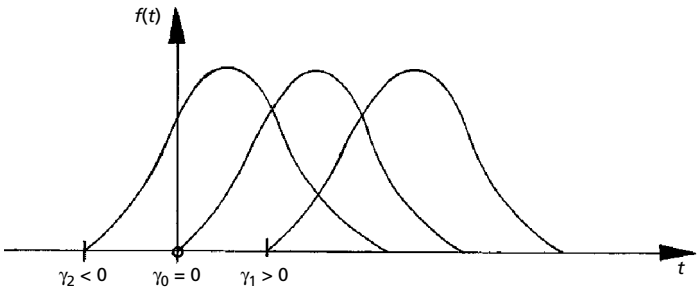


Figure 5.28

Explication : dans l'expression de la fiabilité : $R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$, le terme $(t - \gamma)$ correspond à un changement d'origine par une translation d'abscisse $t = \gamma$.

5.3.4 Modèle de Weibull : recherche de la *MTBF*

Dans un contexte de gestion de la maintenance, la connaissance de la *MTBF* d'un système, d'un module interchangeable ou d'un composant sensible est indispensable pour optimiser un plan de maintenance systématique (période d'intervention $T = k \cdot MTBF$). Le problème étant le crédit à accorder à la valeur de *MTBF* trouvée dans le cas, fréquent, d'un échantillonnage réduit. D'où le plan de ce paragraphe.

1. Comment estimer la *MTBF* à partir d'une étude de Weibull ?
2. Quel niveau de confiance lui accorder ?

❑ **MTBF : usage des tables numériques**

☐ **Rappel des formules donnant la *MTBF* et la variance**

$$E(t) = \gamma + \eta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = MTBF$$

dans laquelle Γ est le symbole d'une fonction eulérienne de seconde espèce.

$$v(t) = \eta^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \eta^2\left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\right]^2 = \sigma_2$$

La fonction eulérienne Γ est tabulée dans le tableau 5.9, qui dispense de fastidieux calculs.

☐ **Tableau des valeurs A et B**

À chaque valeur de β sont associés deux coefficients A et B tels que la durée de vie moyenne est donnée par $MTBF = A\eta + \gamma$ et que l'écart-type est donné par $\sigma = B\eta$.

Tableau 5.9 – Tables numériques pour une loi de Weibull

β	A	B	β	A	B	β	A	B
			1,50	0,9027	0,613	4	0,9064	0,254
			1,55	0,8994	0,593	4,1	0,9077	0,249
			1,60	0,8966	0,574	4,2	0,9089	0,244
			1,65	0,8942	0,556	4,3	0,9102	0,239
0,20	120	1 901	1,70	0,8922	0,540	4,4	0,9114	0,235

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

β	A	B	β	A	B	β	A	B
0,25	24	199	1,75	0,8906	0,525	4,5	0,9126	0,230
0,30	9,2605	50,08	1,80	0,8893	0,511	4,6	0,9137	0,226
0,35	5,0291	19,98	1,85	0,8882	0,498	4,7	0,9149	0,222
0,40	3,3234	10,44	1,90	0,8874	0,486	4,8	09160	0,218
0,45	2,4786	6,46	1,95	0,8867	0,474	4,9	0,9171	0,214
0,50	2	4,47	2	0,8832	0,463	5	0,9182	0,210
0,55	1,7024	3,35	2,1	0,8857	0,443	5,1	0,9192	0,207
0,60	1,5046	2,65	2,2	0,8856	0,425	5,2	0,9202	0,203
0,65	1,363	2,18	2,3	0,8859	0,409	5,3	0,9213	0,200
0,70	1,2638	1,85	2,4	0,8865	0,393	5,4	0,9222	0,197
0,75	1,1906	1,61	2,5	0,8873	0,380	5,5	0,9232	0,194
0,80	1,1330	1,43	2,6	0,8882	0,367	5,6	0,9241	0,191
0,85	1,0880	1,29	2,7	0,8893	0,355	5,7	0,9251	0,186
0,90	1,0522	1,77	2,8	0,8905	0,344	5,8	0,9260	0,185
0,95	1,0234	1,08	2,9	0,8917	0,334	5,9	0,9269	0,183
1	1	1	3	0,8930	0,325	6	0,9277	0,180
1,05	0,9803	0,934	3,1	0,8943	0,316	6,1	0,9286	0,177
1,10	0,9649	0,878	3,2	0,8957	0,307	6,2	0,9294	0,175
1,15	0,9517	0,830	3,3	0,8970	0,299	6,3	0,9302	0,172
1,20	0,9407	0,787	3,4	0,8984	0,292	6,4	0,9310	0,170
1,25	0,9314	0,750	3,5	0,8997	0,285	6,5	0,9318	0,168
1,30	0,9236	0,716	3,6	0,9011	0,278	6,6	0,9325	0,166
1,35	0,9170	0,687	3,7	0,9025	0,272	6,7	0,9333	0,163
1,40	0,9114	0,660	3,8	0,9038	0,266	6,8	0,9340	0,161
1,45	0,9067	0,635	3,9	0,9051	0,260	6,9	0,9347	0,160

❑ Intervalles de confiance de la *MTBF*

☐ Niveau de confiance et bande de confiance

Le niveau de confiance habituel auquel on fait les encadrements est 0,90, ce qui signifie qu'il y a 90 % de chances pour qu'à toute valeur t_i corresponde une fiabilité $R(t_i)$ ou une valeur $F(t_i)$ telle que $\text{Prob}(\alpha_1 < R(t_i) < \alpha_2) = 0{,}90$, en particulier :

– pour une valeur de *MTBF* estimée, on aura $\text{Prob}\ (\alpha_1 < R(MTBF) < \alpha_2) = 0{,}90$;

– pour une fiabilité $R(MTBF)$ estimée, on aura $\text{Prob}\ (\beta_1 < MTBF < \beta_2) = 0{,}90$.

Les variations de (α_1, α_2) forment la « bande de confiance ». Pour les rangs médians (petits échantillons < 20), les valeurs limites α_1 et α_2 sont tabulées suivant les rangs à 5 % et à 95 %.

Prenons un exemple relatif à un échantillon « minimal » de $N = 6$ valeurs traitées par les rangs médians, le tableau 5.10 correspondant à la figure 5.29.

Tableau 5.10 – Intervalles de confiance

Ordre *i*	TBF	*F(i)*	Rangs à 5 %	Rangs à 95 %
4	$5{,}2 \times 10^5$ cycles	0,579	0,271	0,847

Les valeurs 0,271 et 0,847 sont tirées des tableaux 5.11 et 5.12.

À la notation $F(i) = F(t) = 0,579$ (si $F(i)$ est sur la droite D_1) nous substituons la notation probabiliste $\text{Prob}\ (0{,}271 < F(t) < 0{,}847)$, qui correspond à un encadrement « très large » explicable fort logiquement par la petitesse de l'échantillon. Ou encore :

$$\text{Prob}\ (0{,}271 > F(t)) = 0{,}05$$

$$\text{Prob}\ (0{,}847 > F(t)) = 0{,}95$$

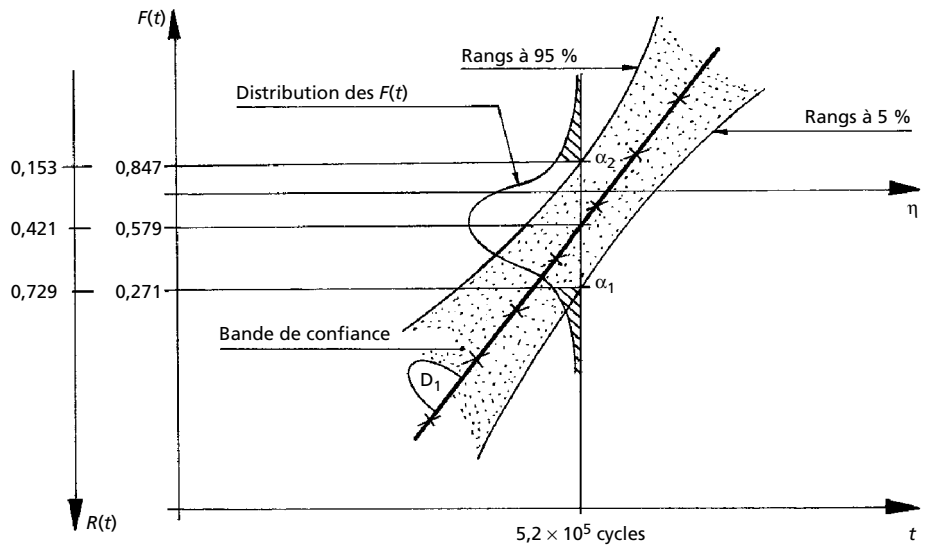


Figure 5.29

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Par complémentarité de $F(t)$, il est possible d'encadrer la fiabilité $R(t)$ par la fourchette (0,153 ; 0,729).

□ Table des rangs médians à 5 %

Cette table permet le tracé du niveau à 5 %, niveau inférieur de la bande de confiance à 90 % (tableau 5.11).

Tableau 5.11 – Tables numériques donnant les rangs médians à 5 %

Ordre de rang	Taille de l'échantillon									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1	5,000	2,532	1,699	1,274	1,021	0,851	0,730	0,639	0,568	0,512
2		22,361	13,535	9,761	7,644	6,285	5,337	4,639	4,102	3,677
3			36,840	24,860	18,925	15,316	12,876	11,111	9,775	8,726
4				47,287	34,259	27,134	22,532	19,290	16,875	15,003
5					54,928	41,820	34,126	28,924	25,137	22,244
6						60,696	47,930	40,031	34,494	30,354
7							65,184	52,932	45,036	39,338
8								65,766	57,086	49,310
9									71,687	60,584
10										74,113

	11	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**
1	0,465	0,426	0,394	0,366	0,341	0,320	0,301	0,285	0,270	0,256
2	3,332	3,046	2,805	2,600	2,423	2,268	2,132	2,011	1,903	1,806
3	7,882	7,187	6,605	6,110	5,685	5,315	4,990	4,702	4,446	4,217
4	13,507	12,285	11,267	10,405	9,666	9,025	8,464	7,969	7,529	7,135
5	19,958	18,102	16,566	15,272	14,166	13,211	12,377	11,643	10,991	10,408
6	27,125	24,530	22,395	20,607	19,066	17,777	16,636	15,634	14,747	13,955
7	34,981	31,524	28,705	26,358	24,373	22,669	21,191	19,895	18,570	17,731

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
8	43,563	39,086	35,480	32,503	29,999	27,860	26,011	24,396	22,972	21,707
9	52,991	47,267	42,738	39,041	35,956	33,337	31,083	29,120	27,395	25,865
10	63,564	56,189	50,535	45,999	42,256	39,101	36,401	34,060	32,009	30,195
11	76,160	66,132	58,990	53,434	48,925	45,165	41,970	29,215	36,811	34,693
12		77,908	68,366	61,461	56,022	51,560	47,808	44,595	41,806	39,358
13			79,418	70,327	63,656	58,343	53,945	40,217	47,003	44,197
14				80,736	72,060	65,617	60,436	56,112	52,420	49,218
15					81,896	73,064	67,381	62,332	58,088	54,442
16						82,925	74,988	68,974	64,057	59,897
17							83,843	76,234	70,420	65,634
18								84,668	77,363	71,738
19									85,413	78,389
20										86,089

□ Table des rangs médians à 95 %

Cette table permet le tracé du niveau à 95 %, niveau supérieur de la bande de confiance à 90 % (tableau 5.12).

Tableau 5.12 – Tables numériques donnant les rangs médians à 95 %

Ordre de rang	Taille de l'échantillon = *N*									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1	95,000	77,639	63,160	52,713	45,072	39,304	34,816	31,234	28,313	25,887
2		97,468	86,465	75,139	65,741	58,180	52,070	47,068	42,914	39,416
3			98,305	90,239	81,075	72,866	65,874	59,969	54,964	50,690
4				98,726	92,356	84,684	77,468	71,076	65,506	60,662
5					98,979	93,715	87,124	80,710	74,863	77,756
6						99,149	94,662	88,889	83,125	77,756

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7							99,270	95,361	90,225	84,997
8								99,361	95,898	91,274
9									99,432	96,323
10										96,488

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	23,840	22,092	20,582	19,264	18,104	17,075	16,157	15,332	14,589	13,911
2	36,436	33,868	31,634	29,673	27,940	26,396	25,012	23,766	22,637	21,611
3	47,009	43,811	41,010	38,539	36,344	34,383	32,619	31,026	29,580	28,262
4	56,437	52,733	49,465	46,566	43,978	41,657	39,564	37,668	35,943	34,366
5	65,019	60,914	57,262	54,000	51,075	48,440	46,055	43,888	41,912	40,103
6	72,875	68,476	64,520	60,958	57,744	54,835	52,192	49,783	47,580	45,558
7	80,042	75,470	71,295	67,49	64,043	60,899	58,029	55,404	52,997	50,782
8	86,492	81,898	77,604	73,641	70,001	66,663	63,599	60,780	58,194	55,803
9	92,118	87,715	83,434	79,393	75,627	72,140	68,917	65,940	63,188	60,641
10	96,668	92,813	88,733	84,728	80,913	77,331	73,989	70,880	67,991	65,307
11	99,535	96,954	93,395	89,595	85,834	82,223	78,809	75,604	72,605	69,805
12		99,573	97,195	93,890	90,334	86,789	83,364	80,105	77,028	74,135
13			99,606	97,400	94,315	90,975	87,623	84,366	81,250	78,293
14				99,634	97,577	94,685	91,535	88,357	85,253	82,269
15					99,680	97,732	95,010	92,030	89,009	86,045
16						99,680	97,868	95,297	92,471	89,592
17							99,699	97,989	95,553	92,865
18								99,730	98,097	95,783
19									99,730	98,193
20										99,744

5.3.5 Modèle de Weibull : optimisation d'une période d'intervention systématique

Faut-il choisir de mettre en œuvre une maintenance corrective ou une maintenance préventive systématique ?

L'outil que nous allons développer est une application pratique de la loi de Weibull qui permet de répondre aux deux questions suivantes :

– existe-t-il une période d'intervention systématique T telle que la maintenance systématique soit plus économique que d'attendre la panne ?

– si oui, quelle est cette période optimisée θ ?

Nous nommerons cet outil d'optimisation économique l'outil « r, β » et nous noterons $\theta = T$ optimisée. Sa justification est longue, mais sa mise en œuvre à partir de l'abaque fourni est très rapide.

❑ Situation du problème et prérequis

Soit un système réparable dont un constituant « fragile » est interchangeable. À quelle période θ doit-on effectuer son remplacement préventif sachant que l'on connaît :

– la loi comportementale $R(t)$ du constituant;

– p, le coût direct de l'intervention corrective, qui est, par hypothèse, égal au coût de l'intervention systématique liée au remplacement du constituant défectueux;

– P, le coût indirect des conséquences de la défaillance ?

Nous nommerons $r = P/p$ le ratio de « criticité économique » de la défaillance. Le domaine de validité de cet outil est $2 < r < 100$.

□ Évaluation de chacun des coûts

Coût C_1 *d'une intervention corrective*

Le coût d'une intervention corrective est $p + P$.

Le coût moyen par unité d'usage (pour comparaison) devient :

$$C_1 = \frac{p + P}{m_\infty}$$

$m_\infty = MTBF$ du composant $= E(t)$ de la loi de Weibull connue.

m_∞ est la durée de vie moyenne des composants fonctionnant sans limite de temps.

Coût $C_2(\theta)$ *d'une intervention préventive*

Si θ est la période de remplacement systématique du composant, le coût aura deux termes :

– le coût de l'intervention p;

– le coût du correctif résiduel lié au risque de défaillance avant θ et évalué par sa probabilité $F(t)$ avec $t < \theta$, soit $PF(t)$ ou $P(1 - R(t))$.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Le coût moyen par unité d'usage est donc :

$$C_2(\theta) = \frac{p + P(1 - R(t))}{m(\theta)}$$

$m(\theta)$ étant la durée de vie moyenne des composants ne dépassant pas θ, puisque changés à cette date :

$$m(\theta) = \int_0^{\theta} R(t)\mathrm{d}t$$

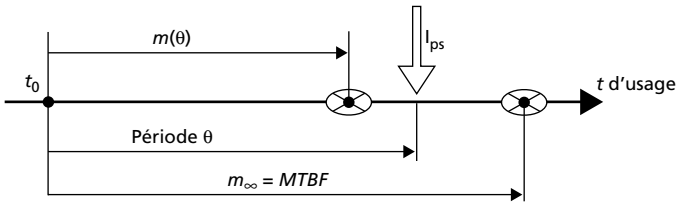


Figure 5.30

□ **Critère de choix d'une politique**

Il est évident qu'il conviendra d'effectuer des opérations préventives si l'on trouve une solution θ telle que $C_2(\theta) < C_1$ que l'on étudiera sous la forme :

$$\frac{C_2(\theta)}{C_1} < 1$$

□ **Principe de l'optimisation de** θ

Le principe consiste à étudier les variations du rapport $C_2(\theta)/C_1$ lorsque θ varie :

– si le rapport reste > 1, il n'y a pas de solution ;

– si le rapport a un minimum < 1, la valeur de $t = \theta$ correspondant au minimum est la solution optimisée.

Formons le rapport et étudions ses variations :

$$\frac{C_2(\theta)}{C_1} = \frac{p + P(1 - R(\theta))}{m_\theta} \times \frac{m_\infty}{p + P}$$

$R(\theta)$ est modélisable par une loi de Weibull à deux paramètres ($\gamma = 0$) :

$$R(\theta) = \mathrm{e}^{-\left(\frac{\theta}{\eta}\right)^{\beta}} \quad \text{et} \quad m_\infty = \eta\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

Posons :

$$x = \frac{\theta}{\eta} \text{ et } r = \frac{P}{p}$$

Après transformations, le rapport devient :

$$\frac{C_2(x)}{C_1} = \frac{1+\left[1-e^{-x^\beta}\right]r}{\int_0^x e^{-t^\beta}\cdot dt} \times \frac{\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)}{1+r}$$

$\frac{C_2(x)}{C_1}$ est dépendant de deux paramètres :

β, paramètre technique, qui caractérise la forme de la distribution ;

r, paramètre économique, caractérise le rapport des coûts indirects/directs (criticité des défaillances).

□ **Exemple de courbe de variation du rapport $C_2(x)/C_1$**

Nous allons tracer la courbe représentative des variations du rapport dans le cas suivant :

– données de fiabilité (Weibull) : β = 3, γ = 0, η = 10 mois (avec une *MTBF* = 8,9 mois) ;

– données économiques estimées : $r = P/p = 10$ puis 5, et 3.

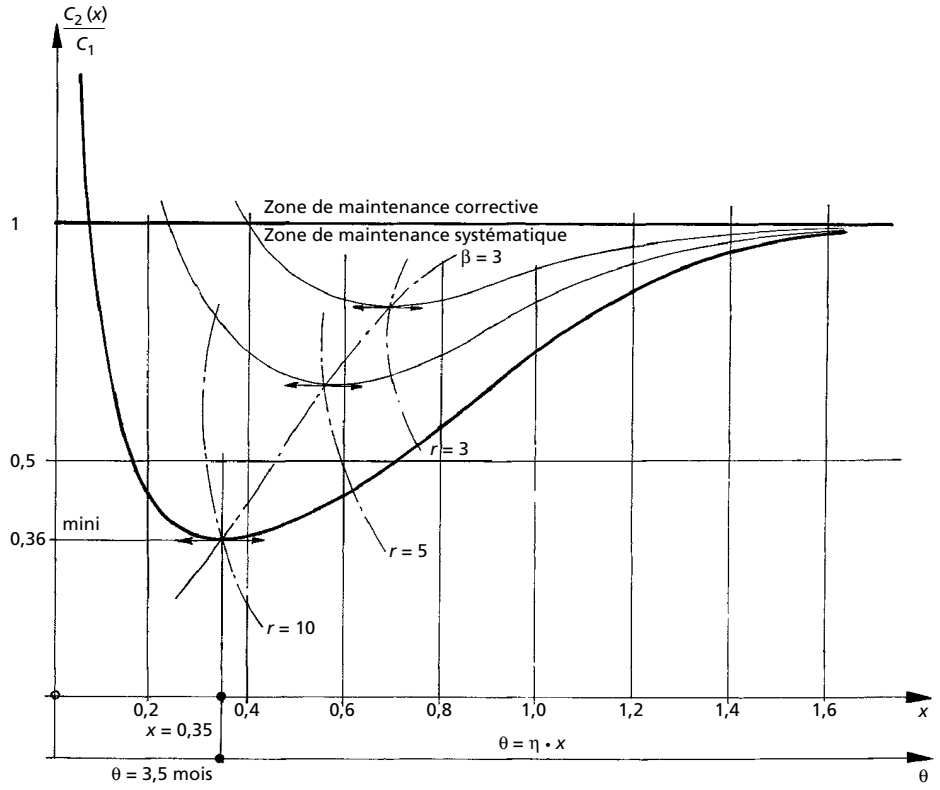


Figure 5.31 – Variations du rapport $C_2(x)/C_1$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

La valeur mini = 0,36 < 1 exprime le gain d'une politique préventive effectuée à $x_0 = 0{,}35$, donc à la période d'intervention systématique $\theta = \eta x_0 = 10$ mois × 0,35 = 3,5 mois. Rappelons que la *MTBF* de cet exemple était de 8,9 mois, ce qui montre que le défaut majeur de la maintenance systématique même optimisée reste l'important « gaspillage de potentiel » d'utilisation du composant changé.

❑ Abaques d'optimisation de la période d'intervention systématique

□ Principe de l'établissement de l'abaque

La courbe précédente ne nous intéresse que par son minimum, repéré par ses coordonnées x et $C_2(x)/C_1$ et paramétré par les deux valeurs de β et r. Nous allons donc ne tracer que chaque point minimum obtenu pour des séries de valeurs de β(1,2 à 4) et de r(2 à 100). Il restera à interpoler ces courbes en fonction des deux paramètres de l'étude à mener.

□ Abaque (r, β) en gestion individuelle (voir figure 5.32)

□ Utilisation de l'abaque

L'intérêt de cet outil réside dans sa grande rapidité d'utilisation. À partir de r et de β, par interpolation des courbes du réseau, nous déterminons graphiquement les coordonnées du point « mini » à l'intersection des deux courbes interpolées :

– l'ordonnée C_2/C_1 donne la valeur du gain par rapport à une politique corrective ;

– l'abscisse x_0 se corrige par la formule de changement de variable :

$$\theta = \eta x_0$$

□ Remarque : gestion individuelle et gestion collective

L'étude précédente a été menée dans le cas le plus fréquent de la gestion individuelle de la maintenance systématique. Ce qui signifie qu'en cas de défaillance résiduelle, le remplacement correctif du composant défaillant initialise une nouvelle période θ.

En gestion collective, par opposition, l'échéancier primitif subsiste : il n'est pas corrigé en cas de défaillance résiduelle. Dans ce cas, l'expression du coût de la politique préventive devient :

$$C_2(\theta) = \frac{p + (p + P) \cdot E(\theta')}{\theta'}$$

La démarche d'établissement de l'abaque « gestion collective » est identique à la précédente.

□ Abaque (r, β) en gestion collective (voir figure 5.33)

L'utilisation de l'abaque et son exploitation sont les mêmes que pour la figure 5.32.

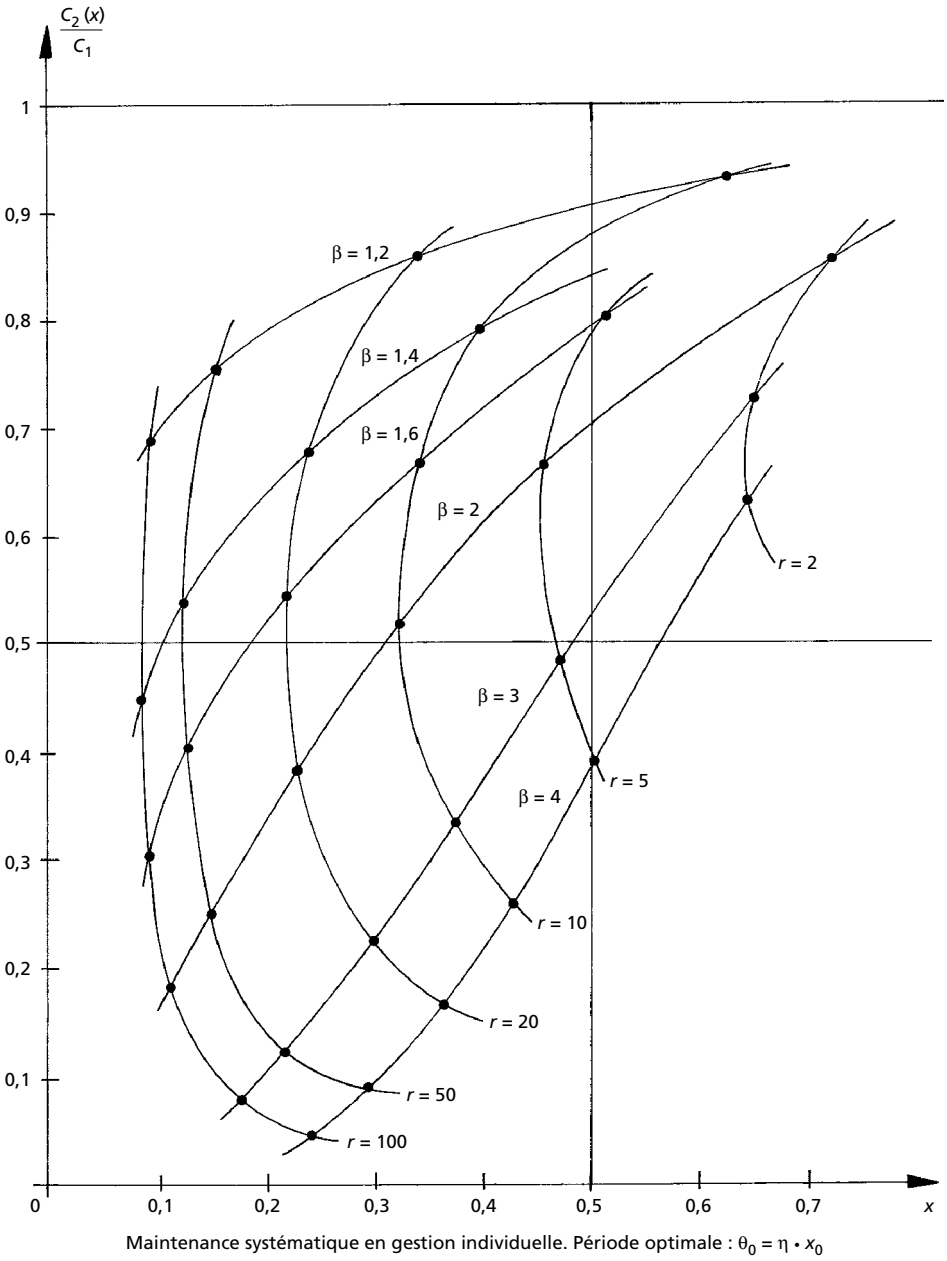


Figure 5.32 – Abaque d'optimisation de la maintenance systématique (gestion individuelle)

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

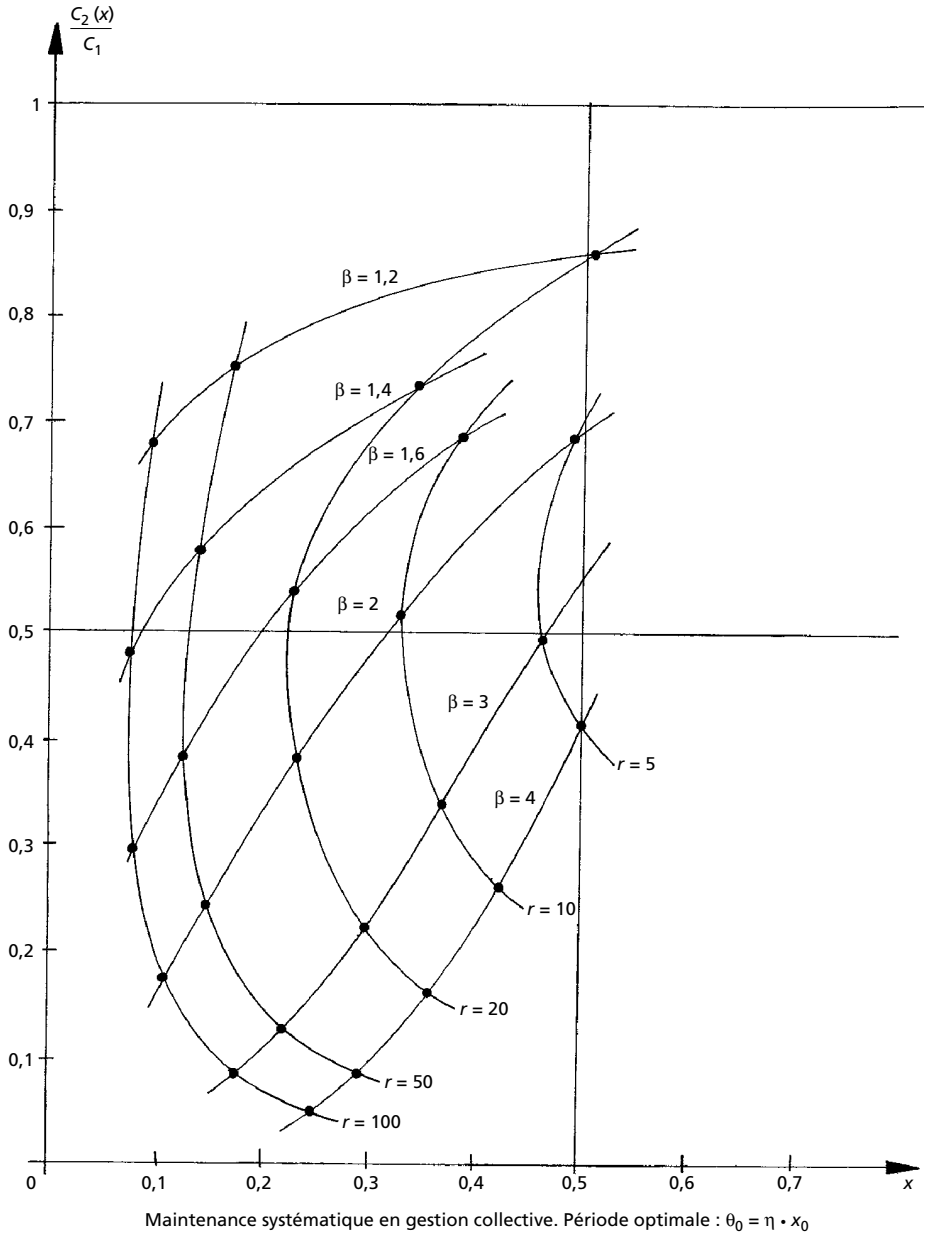


Figure 5.33 – Abaque d'optimisation de la maintenance systématique (gestion collective)

5.3.6 Modèle de Weibull : étude de cas de synthèse

❑ **Thème traité**

Cette étude de cas, réalisée à partir d'un échantillon minimal de six valeurs, a pour objet de montrer l'algorithme d'une analyse de fiabilité et quelques-unes des

exploitations que l'on peut en déduire. Elle se rapporte à l'estimation de la fiabilité d'un roulement à billes, pour lequel les durées de vie exprimées en cycles (ou tours) ont été relevées à partir d'un historique (tableau 5.13).

Tableau 5.13

Numéro de roulement	Nombre de cycles avant rupture
1	$4{,}0 \times 10^5$
2	$1{,}3 \times 10^5$
3	$9{,}8 \times 10^5$
4	$2{,}7 \times 10^5$
5	$6{,}6 \times 10^5$
6	$5{,}2 \times 10^5$

Quels sont les éléments de connaissance que l'on peut déduire d'un tel échantillon ?

❑ Préparation des données

Dressons directement le tableau de valeurs :

– en classant les durées de bon fonctionnement *TBF* par valeurs croissantes. En fait, il s'agit de *TTF* (durées jusqu'à la première défaillance) dont nous recherchons la *MTTF* à l'identique d'une *MTBF*;

– en calculant $F(i)$ par la formule d'approximation des temps médians, car $N = 6 < 20$;

– en intégrant les valeurs tabulées des rangs médians à 5 % et 95 %.

Tableau 5.14

Ordre *i*	*TBF* (cycles avant rupture)	$F(i)$ rangs médians	Rangs à 5 %	Rangs à 95 %
1	$1{,}3 \times 10^5$	0,109	0,85	39,3
2	2,7	0,264	6,3	58,2
3	4,0	0,421	15,3	72,9
4	5,2	0,579	27,1	84,7
5	6,6	0,736	41,8	93,7
6	9,8	0,890	60,7	99,1

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Détermination et exploitation des paramètres

1. Tracé de la droite D_1 de Weibull

Traçons les couples de points $(F(t_i), t_i)$ sur le papier de Weibull. La régression du nuage de points par la droite D_1 s'obtient sans problème (figure 5.34).

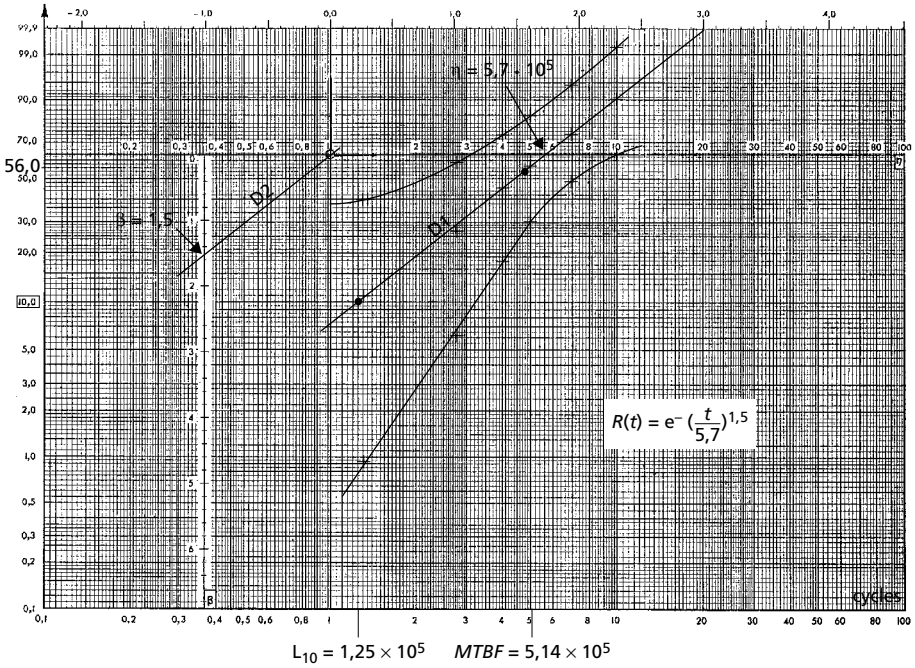


Figure 5.34 – Étude de cas : droite de Weibull

2. Recherche de la valeur des trois paramètres

L'obtention d'une droite sans redressement montre que $\gamma = 0$. La droite D_1 coupe l'axe (t, η) à l'abcisse $\eta = 5{,}7 \times 10^5$ cycles. La parallèle D_2 coupe l'axe β à l'ordonnée $\beta = 1{,}5$. Cette valeur de β est caractéristique d'un phénomène de fatigue, normale pour expliquer la dégradation d'un roulement.

3. Recherche de la MTBF *de la population des défaillances*

Le tableau 5.9 des valeurs de *MTBF* donne, pour $\beta = 1{,}5$, les valeurs de $A = 0{,}90$ et $B = 0{,}61$.

Moyenne :

$$E(t) = A\eta + \gamma = 0{,}90 \times 5{,}7 \times 10^5 = 5{,}1 \times 10^5 \text{ cycles} = MTBF$$

Écart-type :

$$\sigma = B\eta = 0{,}61 \times 5{,}7 \times 10^5 = 3{,}5 \times 10^5 \text{ cycles}$$

4. Fiabilité associée à la MTBF

Graphiquement, nous lisons pour $t = 5{,}1 \times 10^5$ cycles la valeur $F(MTBF) = 56\ \%$, donc $R(t = MTBF) = 44\ \%$, ce qui signifie que 44 % seulement des roulements atteindront la *MTBF* (distribution non symétrique). Remarquons que la détermination analytique correspondante est peu intéressante face à ce résultat graphique immédiat.

5. Durée de vie nominale de ces roulements

Les fabricants de roulements nomment L_{10} leur durée de vie nominale, qui correspond à un seuil de fiabilité de 0,90 tel que 90 % des roulements atteignent $t = L_{10}$.

Graphiquement, à partir de $F(t) = 10\ \%$, nous lisons $L_{10} = 1{,}3 \times 10^5$ cycles.

Analytiquement, nous trouvons :

$$L_{10} = \gamma + \eta(0{,}105)^{\frac{1}{\beta}}$$

Cela signifie que, sur 100 roulements changés systématiquement à $t = L_{10}$, 10 seraient déjà défaillants pour une utilisation égale au quart de la *MTBF* : une politique de maintenance systématique est peu adaptée aux roulements, ce qui explique que l'on cherche à prévenir leurs défaillances à partir des analyses de bruit ou de vibrations.

6. Intervalle de confiance pour t = MTBF

Les tableaux 5.11 et 5.12 nous donnent les limites $\alpha_1 = 0{,}26$ et $\alpha_2 = 0{,}85$ (avec $N = 6$), ce qui permet d'écrire :

$$\text{Prob}\ (0{,}26 < F(t) < 0{,}85) = 0{,}90$$

Donc :

$$\text{Prob}\ (0{,}74 > R(t) > 0{,}15) = 0{,}90$$

Ce résultat relativise l'écriture $R(t = MTBF) = 0{,}44$, montrant la prudence avec laquelle il faut manipuler les résultats issus de très petits échantillons.

7. Équations de R(t), F(t), f(t) *et* λ(t)

La connaissance des trois paramètres de la loi de Weibull permet d'écrire les quatre équations et d'en déduire les quatre courbes représentatives (figure 5.35) :

$$R(t) = \mathrm{e}^{-\left(\frac{t}{5{,}7}\right)^{1{,}5}}$$

$$F(t) = 1 - \mathrm{e}^{-\left(\frac{t}{5{,}7}\right)^{1{,}5}}$$

$$f(t) = \frac{1{,}5}{5{,}7}\left(\frac{t}{5{,}7}\right)^{0{,}5} \mathrm{e}^{-\left(\frac{t}{5{,}7}\right)^{1{,}5}}$$

$$\lambda(t) = \frac{1{,}5}{5{,}7}\left(\frac{t}{5{,}7}\right)^{0{,}5}$$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

8. Représentations graphiques des quatre équations $F(t)$ *et* $R(t)$, $f(t)$ *et* $\lambda(t)$

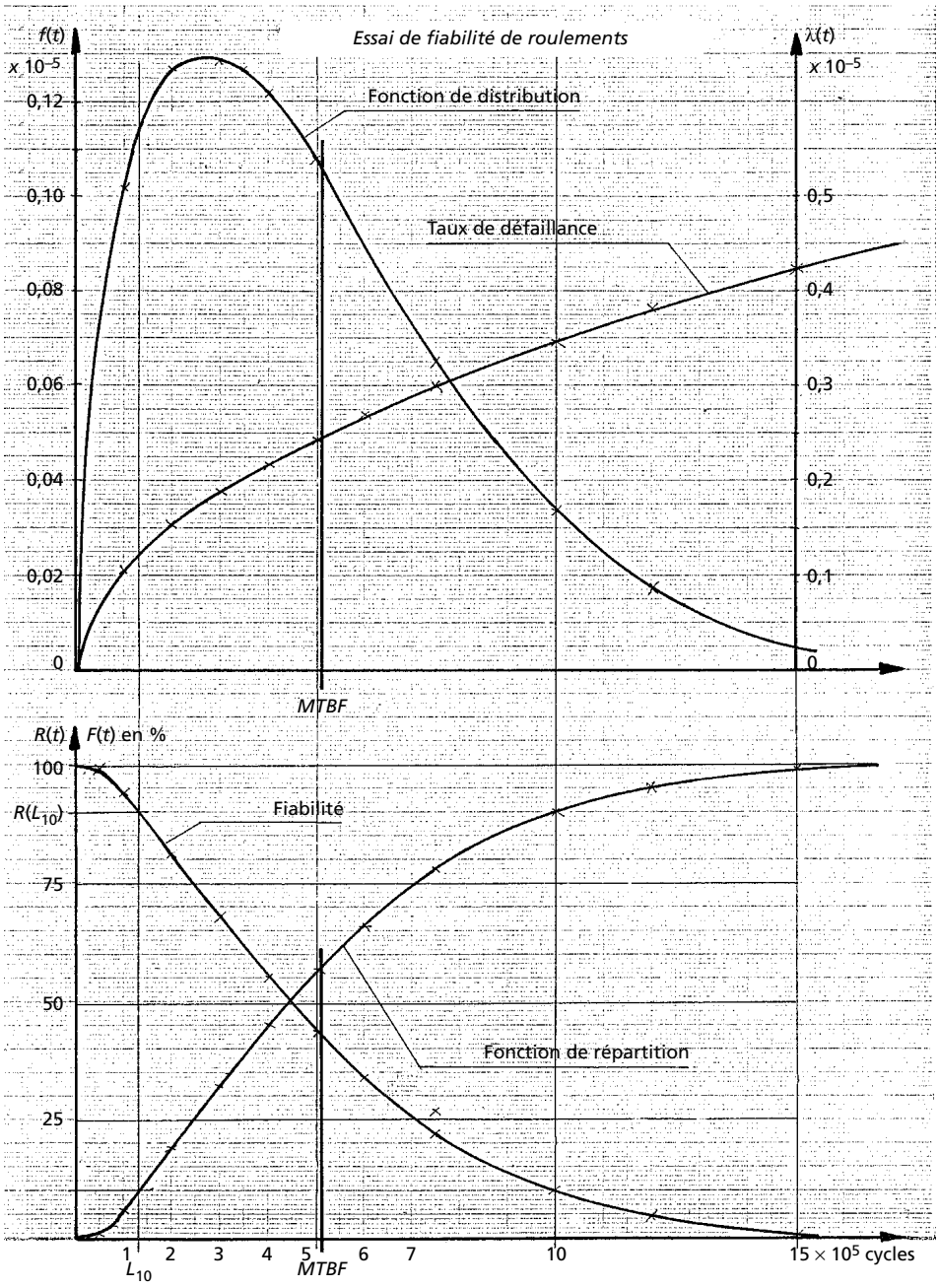


Figure 5.35 – La loi de Weibull : représentation graphique des différentes fonctions

5.4 La maintenabilité intrinsèque et opérationnelle

5.4.1 Introduction à la maintenabilité

❑ Définitions et commentaires

□ Définition AFNOR

Dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits.

□ Définition probabiliste

« Probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions et avec des moyens prescrits. »

□ Commentaires

Nous noterons $M(t)$ la fonction maintenabilité et *TTR*, *MTTR* les durées d'intervention. Cette définition est analogue à celle de la fiabilité, à travers ses quatre concepts :

– probabilité de rétablir = Prob ($TTR < t$) = Prob (pour qu'un système en panne à $t = 0$ soit rétabli à t) ;
– conditions de fonctionnement : elles impliquent la mesure d'un niveau de bon fonctionnement après intervention ;
– limite de temps : elle implique la définition d'un « temps prévu » associé à un délai t ;
– maintenance définie : la durée d'intervention n'a de sens que par référence aux moyens mis en œuvre (procédures, personnels et logistique).

❑ Quelques réflexions préliminaires

□ Différentes formes de maintenabilité

À partir de ces définitions, nous distinguerons :

– la maintenabilité intrinsèque, c'est-à-dire « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges comprenant des critères de maintenabilité (modularité, accessibilité, etc.) ;
– la maintenabilité prévisionnelle est également « construite », mais à partir d'objectifs de disponibilité ;
– la maintenabilité opérationnelle sera mesurée à partir des historiques d'interventions.

Une « analyse de maintenabilité » permettra d'évaluer la *MTTR* ainsi que les lois probabilistes de maintenabilité, à l'identique des analyses de fiabilité.

□ Maintenabilité et maintenance

Pour un technicien, la maintenabilité est la capacité d'un équipement à être rétabli lorsqu'un besoin de maintenance apparaît. L'idée de « facilité de maintenir » se matérialise par des mesures réalisées à partir des durées d'intervention qui seront analysées en détail au paragraphe 6.2.2.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Il est évident que la maintenabilité intrinsèque est le facteur primordial pour que la maintenance soit performante sur le terrain, car l'amélioration ultérieure de la maintenabilité initiale ne sera pas facile. À ce titre, nous pouvons dire que les techniciens de maintenance subiront les conséquences d'une mauvaise construction de la maintenabilité. Il est donc indispensable qu'ils sachent définir leurs besoins et les intégrer à un cahier des charges d'équipement nouveau.

□ **Maintenabilité et disponibilité**

Rappelons le schéma de la disponibilité d'un équipement (figure 5.36).

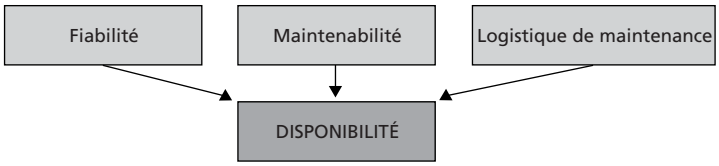


Figure 5.36

Ce schéma met en évidence :

– que la maintenabilité est un des leviers d'action pour améliorer la disponibilité, donc la productivité d'un équipement ;

– que fiabilité et maintenabilité sont deux notions « parallèles » de même importance, et dont les démarches d'analyses sont semblables.

5.4.2 Construction de la maintenabilité intrinsèque : liste des critères

Notre propos n'est pas d'établir un plan de maintenabilité au sens d'Airbus Industrie, mais plus simplement d'analyser qualitativement les critères qui facilitent la vie des techniciens sur site, tout en réduisant les durées d'intervention. En ce domaine, le paradoxe est « qu'il est compliqué de faire simple », de trouver des solutions constructives simples, pour des interventions faciles et rapides avec des outils standard !

La maintenabilité concerne aussi bien les actions correctives que préventives, et c'est souvent « par défaut » que les techniciens découvrent l'importance des critères de maintenabilité.

Remarquons qu'une bonne maintenabilité doit être recherchée là où la fiabilité est douteuse : pièces d'usure ou susceptibles de rupture en particulier. Elle s'obtient par une prise en compte équilibrée de tous les critères énumérés ci-dessous.

❑ **Modularité et interchangeabilité**

La conception modulaire d'un équipement repose sur l'idée de la simplification de sa fabrication, mais aussi de la simplification de sa maintenance grâce à l'interchangeabilité des modules.

Sont interchangeables deux composants, deux modules ou deux équipements pouvant être remplacés l'un par l'autre pour assurer la même fonction. En maintenance, c'est souvent au niveau de la dépose d'un sous-ensemble (module, notion développée au paragraphe 2.2.3) que va s'exercer l'action corrective, préventive ou de diagnostic.

La facilité de l'interchangeabilité (carte électronique par exemple) est un facteur favorisant le transfert de tâche vers les opérateurs, dans le cas de la TPM. Le

module de remplacement peut provenir :
– d'un stock interne (module neuf ou remis en stock après réparation) ;
– d'un stock externe (module ou composant tenu en stock chez le fournisseur) ;
– du bien lui-même (par échange de deux éléments constitutifs, redondance) ;
– d'un bien identique hors service ou déclassé (cannibalisation) ;
– d'un bien différent comportant le même module ;
– d'un atelier de fabrication. Dans le cas d'un composant, il doit être fabriqué dans le respect des spécifications et des tolérances normalisées (joint d'étanchéité, coussinet de palier, etc.).

Cela offre une gamme large de solutions pour organiser une intervention. L'interchangeabilité suppose le respect des normes (ajustements, filetages, produits, lubrifiants, raccords, connexions, etc.). Se méfier des solutions innovantes mais exotiques !

❑ Standardisation

La standardisation vise à la simplification par réduction aussi bien en matière de fabrication que de logistique et de maintenance. En maintenance, elle s'exerce à tous les niveaux techniques et commerciaux, en permettant la réduction des stocks aussi bien que la rapidité et la simplicité des interventions. Prenons quelques exemples.
– Les équipements : il est plus facile de maintenir 10 machines de même type que de types différents.
– Les technologies : il est plus facile de se tenir à un modèle d'automate et de former les techniciens à sa programmation que de multiplier les formations.
– Les modules : utiliser 20 moteurs électriques ou 20 pompes centrifuges identiques offre plus de facilité d'organisation de la maintenance que s'ils étaient tous différents.
– Les outillages : démonter tout un module avec une clé de 13 est plus simple que d'avoir à inventorier toute sa caisse à outils.
– Les composants élémentaires : quincaillerie, visserie, graisseurs, robinets, trappes de visites, interrupteurs sont autant d'éléments qu'il est facile de standardiser.
– Les lubrifiants et leur fournisseur : ne pas suivre les préconisations par références de marque, qui conduiraient à une profusion de fûts. Il existe des tables d'équivalence et il suffit de 5 types d'huile et 2 types de graisse pour assurer la lubrification d'un site industriel.
– Les procédures : standardiser leur présentation facilite l'exploitation.
– Les fournisseurs : un équilibre est à trouver entre le monopole accordé à un fournisseur privilégié et la multiplication des sources.

Notons que la normalisation est un outil de standardisation, qui elle-même facilite l'interchangeabilité.

❑ Accessibilité

L'accessibilité est caractérisée par la rapidité avec laquelle un élément peut être atteint. Elle doit être d'autant mieux maîtrisée que la fréquence probable des opérations de maintenance est grande. C'est le cas des filtres, des graisseurs, des points de réglage, de mesure, de surveillance, etc.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Dans certains cas, l'accessibilité peut être définie sur des bases réglementaires touchant à la sécurité (exemple : échafaudage) ou ergonomiques (dimensions de l'ouverture d'un « trou d'homme » ou d'une trappe de visite).

❑ Aptitude à la pose et à la dépose

L'aptitude à la dépose concerne les modules qui nécessitent un échange standard en préventif ou en cas de défaillance. Elle concerne les liaisons à supprimer pour isoler le module de son ensemble.

Prenons l'exemple d'un groupe moteur électrique-pompe centrifuge : la dépose se rapporte à l'électricité (consignation, accès au bornier, connectique), à l'hydraulique (vannes d'isolement, vidange, boulonnerie des brides), à la mécanique (boulonnerie de la fixation). Des solutions plus ou moins rapides existent pour faciliter chacune de ces opérations de maintenance. Quelques problèmes à optimiser pour améliorer l'aptitude à la pose/dépose :

– réduction du nombre de liaisons ;
– réduction du nombre d'outils à utiliser (standardisation des liaisons) ;
– assurer un pré-positionnement à la pose : repères, tétons de centrage, rails de guidage, détrompeurs ;
– absence de réglages, préférable à des réglages longs et délicats ;
– facilité d'accès.

Notons que l'interchangeabilité d'un module se fait souvent en « temps réel » d'indisponibilité de l'équipement, contrairement à sa remise en état réalisée en temps différé. Son aptitude à la dépose est donc un facteur de disponibilité de l'équipement.

❑ Démontabilité

La démontabilité concerne l'accès plus ou moins facile et plus ou moins rapide à des composants potentiellement « fragiles » et inaccessibles lorsque le sous-ensemble est monté. Elle se caractérise par des manœuvres rapides (portes de visites et capots avec verrous et charnières) demandant un minimum d'outils standards et facilitées par une documentation efficace (perspective éclatée montrant le fractionnement des éléments).

❑ Détectabilité

Elle concerne la réduction des temps de localisation et de diagnostic, principalement pour les parties commandes des équipements. Un logiciel de recherche et de localisation des défauts, les outils d'aide au diagnostic, une supervision, mais aussi un simple voyant ou le repérage des câbles et des points de mesure sont autant d'éléments de réduction des temps d'investigation.

Remarquons que la réalisation d'une AMDEC amène le concepteur à évaluer le critère « détectabilité » et à proposer des solutions si nécessaire.

❑ Impact de l'organisation sur la maintenabilité

Tout ce qui peut être intégré à la conception d'un équipement afin de faciliter sa maintenance ultérieure est un critère de maintenabilité. Il en est ainsi pour l'instal-

lation de compteurs d'unités d'usage, pour les taraudages permettant la fixation d'un accéléromètre de surveillance vibratoire, pour le repérage visuel des graisseurs, pour la présence d'un anneau d'élingage sur le bâti…

Le soutien logistique accompagnant l'équipement est également un critère de maintenabilité. Quelques exemples :

– la possibilité de dépannage par téléphone (télémaintenance) ;
– la formation des techniciens aux interventions correctives probables ;
– l'obtention rapide de pièces de rechange sans ambiguïté de références ;
– le sérieux, la pérennité et la proximité du SAV.

La logistique de maintenance est distincte de la maintenabilité. Remarquons cependant que beaucoup d'éléments de la logistique de maintenance, convergent avec les éléments de maintenabilité intrinsèque afin de réduire les temps d'intervention et les coûts d'indisponibilité des équipements industriels. Citons en particulier :

– la qualité de la documentation technique (DTE),
– la disponibilité des rechanges en stock interne,
– l'efficacité des moyens mis à disposition. Cette efficacité peut être vérifiée en observant le chronogramme d'un dépannage (Figure 5.37).

❑ Analyse de « la fonction dépannage »

Cette méthode s'adresse plus particulièrement aux PME ayant une structure de maintenance légère.

Elle permet d'analyse le fonctionnement du service de maintenance lors d'une panne en introduisant une réflexion basée sur le chronogramme suivant.

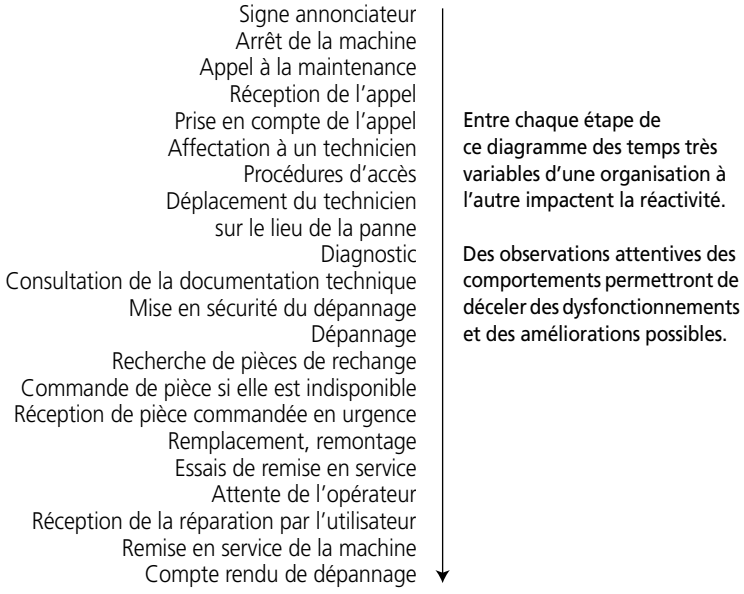


Figure 5.37 - Chronogramme d'un dépannage

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Le tableau ci-dessous explique les dysfonctionnements pouvant être relevés lors de l'analyse des faits selon le chronogramme précédent et propose des suggestions d'amélioration.

Étape du chronogramme	Dysfonctionnements	Améliorations possibles
Signe annonciateur de la panne (bruit, ralentissements, micro-arrêt, message sur commande numérique)	Personne n'a fait attention aux vibrations de plus en plus fréquentes ou au message affiché sur la commande numérique. La machine est sale et empêche de voir les fuites ou autres dysfonctionnements. Les utilisateurs considèrent que c'est le problème de la maintenance.	Faire des tournées d'inspection journalières. Sensibiliser les opérateurs en pratiquant éventuellement la TPM (Totale Productive Maintenance).
Arrêt de la machine	Pas de relevé du moment exact de la panne ni dans la GMAO (ou équivalent) ni dans le suivi de production ou GPAO	Donner des moyens pour signaler la panne et l'horodater : – documents papiers – accès à des terminaux portables – téléphone Éventuellement créer des liaisons entre automates programmables et GMAO pour être certain de l'horodatage de la panne. Effectuer régulièrement des analyses de ces informations lors des retours d'expérience. Assurer un retour d'information vers la production.
Temps de réaction de l'utilisateur avant appel à la maintenance	L'opérateur en profite pour faire une pause avant d'appeler la maintenance. Le service production laisse la machine de côté et l'oublie pour utiliser une machine inoccupée. Il se rappelle de la panne quelque temps plus tard quand il a besoin de la machine défectueuse.	
Appel à la maintenance	Pas de n° de téléphone d'urgence, « on ne sait pas à qui s'adresser » et on attend le passage du chef actuellement en réunion. On constate plusieurs appels (des différentes équipes postées) pour une même panne.	Des fiches d'information sont affichées près de la machine avec les adresses n° de téléphone. Utiliser la demande d'intervention de la GMAO avec un indicateur de doubles demandes. Enregistrement dans un cahier des demandes d'intervention avec indications de leur prise en compte.

Étape du chronogramme	Dysfonctionnements	Améliorations possibles
Réception de l'appel	Il n'y a personnes à temps complet pour les recevoir. Les notes sont écrites dans un carnet lu irrégulièrement ou elles se perdent très souvent.	En l'absence de permanence pour recevoir les appels, équiper le responsable d'un téléphone mobile, pager ou autre dispositif d'appel automatique. Ou encore organiser des permanences avec des techniciens ou des agents de service méthode.
Prise en compte de l'appel	C'est toujours dans l'urgence. C'est le dernier qui appelle qui a la priorité. Quand le responsable n'est pas là on ne sait pas que faire.	Les équipements et les pannes sont affectées d'un niveau de priorité qui facilité les planifications et les affectations. Des procédures rédigées en commun et éventuellement un plan de maintenance corrective permettent de définir les tâches à accomplir même en l'absence du chef. Les techniciens sont équipés de téléphones mobiles et ont une ligne de conduite précise.
Affectation à un technicien	C'est celui qui passe par là qui reçoit la mission. On attend le retour des techniciens pour voir qui est disponible.	Faire un tableau de suivi des affectations. Indiquer les temps approximatifs des interventions pour avoir une idée de la charge de travail des techniciens et des prochaines disponibilités. Les techniciens sont équipés de téléphones mobiles pour éventuellement les « distraire » d'un travail en cours en cas d'urgence réelle. La GMAO permet de savoir qui fait quoi et où.
Procédures d'accès	Cela concerne les points d'accès à risque (chemin de fer, nucléaire,…)	En général les procédures sont bien établies et respectées, sécurité oblige.
Déplacement du technicien sur le lieu de la panne	Les jeunes techniciens se perdent régulièrement. C'est encore pire pour les sous-traitants.	Un OT issu de la GMAO est imprimé à chaque intervention avec des indications géographiques ou de trajet. Des repères XY permettent de se situer dans tous les points de l'usine.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Étape du chronogramme	Dysfonctionnements	Améliorations possibles
Diagnostic	Le technicien ne connaît pas la machine et ne sait pas ce qui est normal ou non. Le technicien arrive et constate que la panne a été réparée.	Améliorer la formation. Utiliser les retours d'expérience issus des comptes rendus dans la GMAO. Lors des comptes rendus et affectations supprimer les doubles demandes d'intervention.
Consultation de la documentation technique	Le technicien ne prend pas le temps de la consulter. Les documents techniques sont : – dans le bureau du chef – dans le bureau de l'acheteur(!) – dans le magasin	Inciter les techniciens à leur utilisation. Organiser la documentation, la ranger dans un endroit accessible. Réclamer aux constructeurs les documents manquants. Codifier les pièces avec un code fabricant de manière à pouvoir exploiter les informations du document et trouver la pièce en magasin rapidement.
Dépannage	Le technicien n'a pas amené les bons outils ou les bonnes pièces de rechange alors que c'était prévisible. Cela occasionne de longs temps de déplacements. Un podomètre placé à titre expérimental a révélé que des techniciens parcouraient 20 km dans la journée. Le technicien ne constate pas de défaillance.	Créer des plans de maintenance corrective : un signalement de panne pour un équipement correspond à une liste d'instructions avec pièces de rechange et outils conseillés. Attention aux pannes intermittentes fréquentes avec les matériels électroniques. Faire une enquête auprès des utilisateurs pour relever le moment et les circonstances exactes de la panne.
Sécurité lors du dépannage	Des incidents ou des accidents sont fréquents pour les dépanneurs ou les opérateurs. Des passants risquent de se blesser à cause de matériel démonté qui encombre les lieux de circulation ou de stationnement.	Faire imprimer automatiquement sur les OT de la GMAO les recommandations liées à une machine : permis de feu, habilitations, consignations obligatoires, présence de deux personnes obligatoire… Imposer l'utilisation des barrières de sécurité.

Étape du chronogramme	Dysfonctionnements	Améliorations possibles
Recherche de pièces de rechange	Recherche de la bonne pièce, la codification	Mettre à jour les nomenclatures des équipements (liste des pièces de rechange courante).
	Attente inutile au magasin.	Possibilité de consulter depuis la GMAO la disponibilité des pièces de rechange dans le magasin avant de se déplacer.
	La pièce de rechange commandée spécialement et en urgence a été utilisée pour une autre intervention.	Indiquer pour chaque commande « flux tendu » le n° d'OT à l'origine de cette demande. Revoir l'organisation logistique, intégrer la logistique à la maintenance dans la GMAO.
	Il faut attendre le retour du magasinier pour avoir la pièce.	Prévoir l'accès au magasin pour les procédures urgentes lors de la fermeture du magasin.
		Codifier les pièces avec un code fabricant de manière à pouvoir exploiter les informations du document et trouver la pièce en magasin rapidement.
Commande de pièce indisponible	Pour compenser le délai de passation de commande (3 semaines) un « arrangement » est passé avec le distributeur local qui envoie la pièce en contrepartie d'un fax. La commande sera régularisée par après ce qui cause des problèmes administratifs.	Mise à disposition d'une procédure simplifiée de passation de commande.
		Amélioration des procédures administratives.
		Déléguer des montants de commande.
		Demander le prix au fournisseur qui envoie un fax ou mail transmis à l'acheteur.
Réception de pièce commandée en urgence	La pièce est reçue mais le technicien ne le sait pas.	Afficher un avis de réception.
	Le magasinier circule dans les ateliers la pièce à bout de bras en demandant « Pour qui est cette pièce ? »	Si la GMAO existe, passer la commande sur un n° d'OT qui sera affiché ainsi que le demandeur lors de la réception.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Étape du chronogramme	Dysfonctionnements	Améliorations possibles
Remplacement, remontage	Outils inadaptés. Oubli de la méthode de démontage.	Revoir régulièrement l'inventaire des outils. La même personne procède au démontage et au remontage. Les vis non remplaçables et autres accessoires sont rangés dans une boîte en attendant le remontage.
Essais de remise en service	Le technicien ne sait pas si la machine est correctement réparée. Il y a conflit avec l'utilisateur à ce sujet.	Effectuer des caractérisations de chaque machine ou équipement : vitesse normale en charge, mesures à effectuer et valeurs attendues, cadence mini et maxi, courant consommé en charge, etc.. Ces paramètres seront vérifiés à la fin du dépannage. Relever ces mesures dans le compte rendu de dépannage et les faire constater par l'utilisateur.
Attente de l'opérateur	L'opérateur est parti faire autre chose ce qui cause un certain temps de non-utilisation de la machine avant sa remise en état.	Rédiger des procédures avec le service utilisateur lequel devra nommer un responsable pour réceptionner la remise en état et constater qu'elle est effective et satisfaisante.
Réception de la réparation par l'utilisateur	L'utilisateur réclame le passage d'un dépanneur sans savoir que la réparation a été faite depuis un certain temps (ce que le responsable de maintenance est heureux de lui annoncer d'un air goguenard).	Faire constater la remise en état par l'utilisateur sur papier ou dans la GMAO et diffuser l'information. S'assurer que c'est sur la bonne machine qui a été « réparée » !!
Remise en service de la machine	Ce n'est pas la bonne machine qui a été réparée ce qui explique pourquoi le technicien n'a rien constaté. Attente de la production avant de la réutiliser ce qui allonge le temps de non-fonctionnement.	Étiquetage de toutes les machines et mention obligatoire lors de la demande d'intervention. Remise d'un OT détaillé avec le n° de la machine et son emplacement. Mentionner sur le compte rendu l'heure, minutes de la remise en état

5.4.3 Approche mathématique de la maintenabilité

❑ **La fonction maintenabilité *M*(*t*)**

□ **Obtention des données**

Les *N* valeurs de l'échantillon des durées d'intervention seront relevées à partir des bons de travaux complétés, puis portés sur l'historique d'un équipement, que ce soit sous une forme « papier » ou « écran ».

L'analyse de maintenabilité peut porter sur l'ensemble de l'équipement, afin de déterminer sa disponibilité opérationnelle le plus souvent, ou sur l'un quelconque de ses modules. C'est ainsi que sont élaborés par exemple les barèmes de temps de réparation automobile.

□ **Fonctions mathématiques caractéristiques**

Étant donné l'analogie existant entre les notions de fiabilité, largement développées au paragraphe 5.2, et les notions de maintenabilité, nous serons plus concis ici, car les démarches d'analyses sont semblables.

– Variable aléatoire : c'est la durée d'une intervention préventive ou corrective de maintenance. Nous la noterons $t = TTR$ (*time to repair*, ou temps technique de réparation), de moyenne *MTTR*.
– La densité de probabilité est $g(t)$. Par nature, la distribution des durées d'intervention sera dissymétrique ainsi que nous l'expliquerons au paragraphe 6.2.2. Les lois de probabilité ajustables à cette dissymétrie seront la loi log-normale, la loi gamma et la loi LVE des valeurs extrêmes (sous sa forme 1 nommée loi de Gumbel).
– La fonction de répartition est $M(t)$. Elle exprime la probabilité qu'une intervention ait une durée $TTR < t$, ou que le système en panne à $t = 0$ soit rétabli à t :

$$M(t) = g(t)\,\mathrm{d}t = \text{Prob}\,(TTR < t)$$

– L'espérance mathématique ou durée d'intervention moyenne *MTTR* s'exprime par :

$$MTTR = t \cdot g(t)\,\mathrm{d}t$$

□ **Taux de réparation $\mu(t)$**

De façon analogue au taux de défaillance, nous définissons un taux de réparation $\mu(t)$ tel que :

$$\mu(t) = \frac{g(t)}{1 - M(t)}$$

□ **Hypothèse exponentielle**

Les calculs prévisionnels de maintenabilité reposent sur l'hypothèse exponentielle, signifiant ici que le taux de réparation μ est supposé constant. La répartition des temps de réparation est alors exponentielle, selon la formule :

$$M(t) = 1 - \mathrm{e}^{-\mu t}$$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

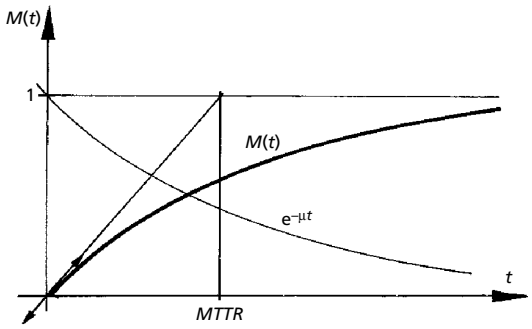


Figure 5.38

Espérance mathématique :

$$E(t) = MTTR = \tau = \frac{1}{\mu}$$

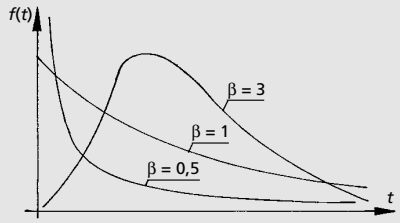
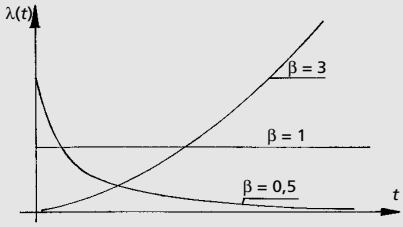
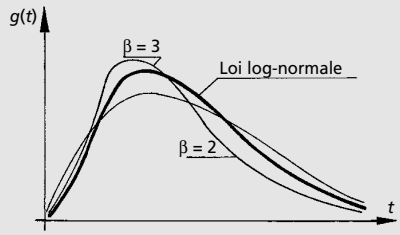
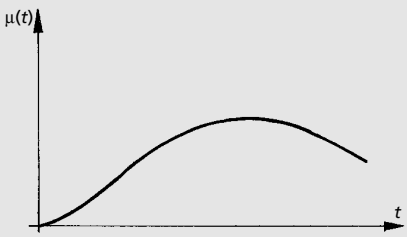
❑ Analogie des analyses de fiabilité et de maintenabilité

La comparaison de ces deux analyses est synthétisée au tableau 5.15.

Tableau 5.15 – Comparaison des analyses mathématiques de R(t) et de M(t)

Fiabilité	Maintenabilité
Probabilité de « durée de bon fonctionnement »	Probabilité de « durée de réparation »
$R(t) = P(T_p > t)$	$M(t) = P(T_R < t)$
Variable aléatoire : temps de fonctionnement	Variable aléatoire : temps de réparation
Densité de probabilité du temps avant défaillance : $f(t)$	Densité de probabilité du temps de réparation : $g(t)$
Fiabilité : $R(t) = \int_t^{+\infty} f(t)\mathrm{d}t = \mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t)\mathrm{d}t}$	Maintenabilité : $M(t) = \int_0^t g(t)\mathrm{d}t = 1 - \mathrm{e}^{-\int_0^t \mu(t)\mathrm{d}t}$
Taux de défaillance : $\lambda(t)$: $\lambda(t)\mathrm{d}t = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)}$	Taux de réparation $\mu(t)$: $\mu(t)\mathrm{d}t = \frac{g(t)}{1-M(t)}$
MTBF = mean time between failures : $MTBF = \int_0^{+\infty} t \cdot f(t)\mathrm{d}t = \int_0^{+\infty} R(t)\mathrm{d}t$	*MTTR = mean time to repair* : $MTTR = \int_0^{+\infty} t \cdot g(t)\mathrm{d}t$
Relation fondamentale : $f(t) = \lambda(t) \cdot \mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t)\mathrm{d}t}$	Relation fondamentale : $g(t) = \mu(t) \cdot \mathrm{e}^{-\int_0^t \mu(t)\mathrm{d}t}$

Tableau 5.15 – Comparaison des analyses mathématiques de R(t) et de M(t)

Lois usuelles : si λ = constant, loi exponentielle : $R(t) = e^{-\lambda t}$ si $\lambda(t)$ est variable, loi de Weibull (loi à 3 paramètres)	Lois usuelles : si μ = constant, loi exponentielle : $M(t) = 1 - e^{-\mu t}$ si $\mu(t)$ est variable, loi log-normale (distribution fréquente des durées d'interventions de maintenance), paramètres m et σ
	
	Une modélisation par la loi de Weibull avec $2 < \beta < 3$ est possible
	
Application : systèmes réparables ou non	Application : systèmes réparables

❑ Analyses prévisionnelles de maintenabilité

Lorsque le concepteur d'un système se voit imposer une performance de disponibilité à atteindre, il doit prendre en compte des éléments de maintenabilité pour les intégrer, soit à la quantification d'arbre de défaillance, soit à des modélisations de type graphe de Markov, classiques en SdF (sûreté de fonctionnement).

□ Quantification d'un arbre de défaillance dépendant du temps

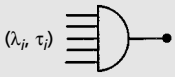
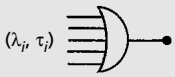
Un arbre de défaillance permet d'identifier les défaillances élémentaires (voir § 4.5.4) influentes sur la disponibilité du système. Si l'on prend en compte pour chaque défaillance élémentaire son taux de défaillance λ et son taux de réparation μ supposés constants, il devient possible de quantifier chaque branche de l'arbre jusqu'à l'estimation de la disponibilité prévisionnelle :

$$Ds = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$$

En se plaçant dans l'hypothèse exponentielle et avec $MTTR = \tau = 1/\mu$, nous obtenons le tableau comparatif 5.16.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Tableau 5.16 – Comparaison des systèmes réparables ou non réparables

	Systèmes non réparables	Systèmes réparables (arbres dépendant du temps)
Porte ET 	$\lambda = \prod_{i=1}^{n} \lambda_i$ $(\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \ldots \cdot \lambda_n)$	$\lambda = \prod_{i=1}^{n} (\lambda_i \tau_i) \cdot \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\tau_i}$ $\tau = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\tau_i}}$
Porte OU 	$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ $(\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \ldots + \lambda_n)$	$\lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i$ $\tau = \frac{\sum \lambda_i \tau_i}{\sum \lambda_i}$

☐ Graphes de Markov

Un graphe de Markov est caractérisé par un certain nombre d'états représentatifs de la situation d'un système de production que l'on modélise à l'instant *t*, et de transitions décrivant l'évolution dans le temps. Les quatre états classiques d'un équipement sont le repos, le travail, la maintenance corrective et la maintenance préventive. Il est également possible de faire une analyse sur trois états : le travail (ou bon fonctionnement), la panne (ou maintenance corrective) et le mode dégradé. Les arcs représentent les taux de transition, suivant la modélisation de la figure 5.39.

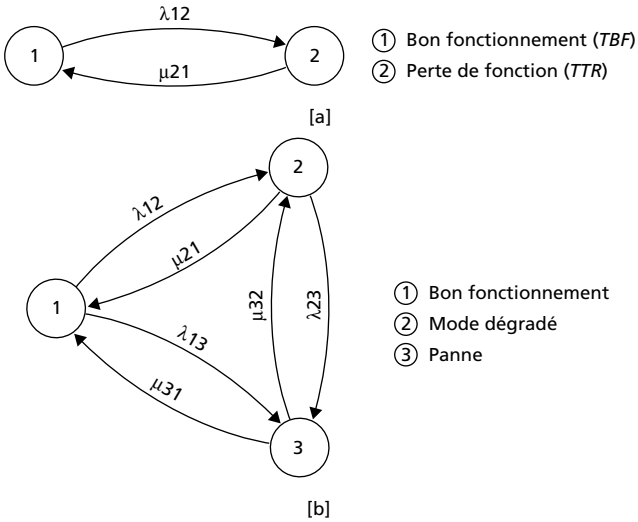


Figure 5.39 – Graphes de transition :
(a) entre deux états (2 paramètres λ et μ);
(b) entre trois états (6 paramètres λ et μ)

La résolution du système d'équations de probabilité se fait en utilisant les transformées de Laplace. Mises sous forme matricielle, elles forment un système d'équations résolues par la méthode de Cramer, qui a l'avantage de pouvoir se mettre sous informatique. Néanmoins, les évaluations de disponibilité et l'optimisation des paramètres relèvent d'un traitement mathématique complexe, qui sort du cadre de cet ouvrage. Pour application, nous renvoyons le lecteur à la littérature de la SdF.

Rappelons le cadre de notre propos : il s'agit de mettre à disposition de l'industrie, de ses ingénieurs et de ses techniciens de maintenance quelques outils a priori simples à appliquer, tirés des méthodes de la sûreté de fonctionnement.

5.4.4 L'analyse de maintenabilité opérationnelle

❑ Pourquoi réaliser des analyses de maintenabilité

Comme pour la fiabilité, les analyses de maintenabilité opérationnelle se justifient :

– dans le cadre d'une évaluation précise de la disponibilité opérationnelle d'un équipement, et le suivi de ses variations et tendances. En effet, il est logique de mettre en œuvre des moyens homogènes pour estimer la *MTBF* et la *MTTR* tout en s'affranchissant de l'hypothèse exponentielle ;

– dans le cadre de la génération de standards de temps en interne, afin d'améliorer l'ordonnancement ou de mieux maîtriser certains coûts directs ;

– dans le cadre de la rédaction de clauses de maintenabilité quantifiées pour de futurs équipements ;

– dans le cadre de la recherche d'amélioration permanente de l'efficacité des actions de maintenance.

> **Remarque**
>
> La maintenabilité opérationnelle mesurée par l'indicateur *MTTR* est la résultante de la maintenabilité intrinsèque, de la logistique de maintenance et de l'efficacité propre aux intervenants.

❑ Comment réaliser des analyses de maintenabilité

Elles reposent sur le traitement d'échantillons de N durées d'intervention *TTR* collectées sur l'historique des interventions relatives à un type d'équipement. Comme pour la fiabilité, elles peuvent concerner l'ensemble d'un système ou se rapporter aux seules interventions sur un module sensible particulier.

Pour les grands échantillons, la loi de probabilité utilisée est la loi log-normale. Pour les petits échantillons, la loi des valeurs extrêmes (ou de Gumbel) est mieux adaptée.

Le paragraphe 6.2, « Analyse des temps de maintenance », étudie le détail des saisies à opérer. Le paragraphe 5.4.5 suivant développe un exemple d'application par la loi de Gumbel.

5.4.5 Analyse de maintenabilité : étude de cas

❑ Thème traité

Soit un petit échantillon de $N = 19$ valeurs issues du retour des bons de travaux en clientèle, dans le cadre d'un contrat de maintenance. Ces interventions correctives

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

longues se rapportent toutes à un même module fragile de l'équipement à maintenir. Une révision des prix de contrat s'impose : sur quelle base de temps ?

Les 19 durées ont été traduites en heures et 1/10 d'heures : 4,3 – 9,7 – 7,3 – 8,5 – 6,8 – 4,7 – 9,0 – 5,9 – 11,5 – 3,6 – 8,0 – 13,9 – 5,5 – 10,3 – 3,4 – 16 – 6,4 – 4,5 – 12,7.

❑ Préparation des données

Ordonnons les durées par valeurs croissantes et traitons-les par les rangs moyens $M(i) = i/N + 1 = i/20$. Les données ainsi traitées sont regroupées dans le tableau 5.17.

Tableau 5.17 – Étude de maintenabilité

i	*TTR*	*M*(*i*)	*i*	*TTR*	*M*(*i*)	*i*	*TTR*	*M*(*i*)
1	3,4	0,05	7	5,9	0,35	13	9,0	0,65
2	3,6	0,10	8	6,4	0,40	14	9,7	0,70
3	4,3	0,15	9	6,8	0,45	15	10,3	0,75
4	4,5	0,20	10	7,3	0,50	16	11,5	0,80
5	4,8	0,25	11	8,0	0,55	17	12,7	0,85
6	5,5	0,30	12	8,5	0,60	18	13,9	0,90
						19	16,0	0,95

❑ Application à la loi des valeurs extrêmes

La loi des valeurs extrêmes « LVE » pour petites valeurs a pour fonction de répartition :

$$M(t) = \exp\left|- \mathrm{e}^{-a(t-u)}\right| = P(T < t)$$

dans laquelle a est l'inverse de la pente du papier fonctionnel de Gumbel et u est le paramètre de localisation.

La *MTTR*, ou espérance mathématique de la loi, a alors pour valeur :

$$MTTR = u + \frac{0{,}5778}{a}$$

Le papier fonctionnel spécifique est d'usage très simple, suivant la procédure d'étude ci-dessous.

❑ Procédure d'analyse pour la loi LVE

☐ Utilisation du papier de Gumbel

Portons les couples de points (TTR_i, $M(i)$) sur le papier fonctionnel relatif à la loi de Gumbel, les rangs moyens étant en abscisse. La régression des 19 points par une droite est ici facile (figure 5.40).

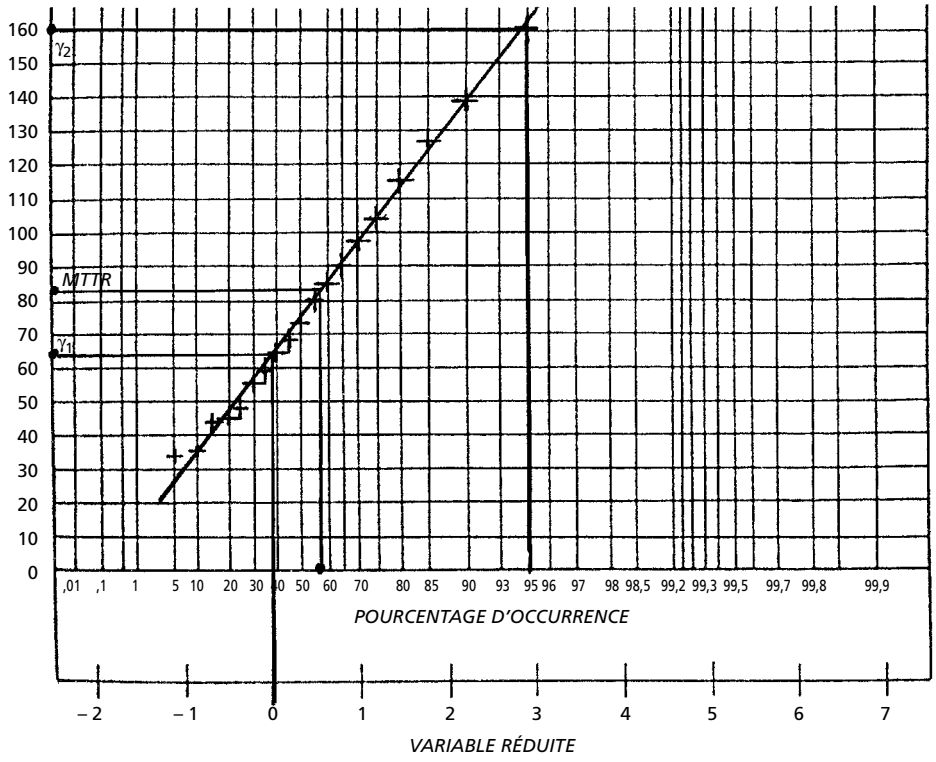


Figure 5.40 – Application de la loi de Gumbel à la maintenabilité

□ **Détermination des deux paramètres sur le papier fonctionnel**

Le papier fonctionnel a été conçu de telle sorte que $u = \gamma_1$ se trouve sur l'ordonnée correspondante à la probabilité 0,37 ou 0 sur l'échelle réduite et que γ_2 se trouve sur l'ordonnée correspondante à la probabilité 0,95 (ou 3 sur l'échelle réduite).

Nous lisons $\gamma_1 = 6{,}3$ heures $= u$ et $\gamma_2 = 16$ heures.

La pente a pour valeur :

$$\frac{1}{a} = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{3} = \frac{16 - 6{,}3}{3} = 3{,}23$$

Donc $a = 1/3{,}23 = 0{,}309$.

□ **Calcul de la *MTTR***

$$MTTR = u + \frac{0{,}5778}{a} = 6{,}3 + \frac{0{,}5778}{0{,}309} = 8{,}17 \text{ heures}$$

□ **Expression de la maintenabilité déduite de l'échantillon**

$$M(t) = \exp\left|- e^{-0{,}309(t-6{,}3)}\right|$$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Il est donc possible de représenter graphiquement cette fonction et d'associer par calcul à chaque durée d'intervention sa probabilité de « tenir le délai » et réciproquement. Mais il est plus rapide et plus simple d'obtenir le couple $(t, M(t))$ directement sur le papier de Gumbel.

Exemple

À la *MTTR* est associée une probabilité de 58 % de terminer l'intervention avant 8,17 heures (figure 5.40). Il y a 80 % de chances de terminer l'intervention en moins de 11,3 heures, mais il n'y a que 23 % de chances qu'elle se termine en moins de 5 heures. Remarquons que changer la logistique et l'organisation de cette intervention revient à changer la loi, donc à déterminer ses nouveaux paramètres.

5.5 La disponibilité des systèmes réparables

5.5.1 Disponibilité : définition et différentes formes

❑ Rappel de la définition du projet CEN WI 319-003

Disponibilité : « Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée. »

Remarque

« Les moyens autres que la logistique de maintenance (personnel, documentation, rechanges, équipements d'essai, ateliers) n'affectent pas la disponibilité d'un bien. »

La figure 5.41 illustre les trois facteurs d'influence de la disponibilité intrinsèque D_i.

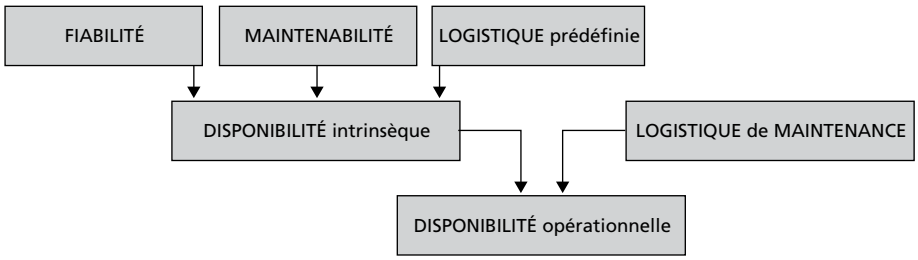


Figure 5.41 – Disponibilité intrinsèque et opérationnelle

Remarques

– Seuls les temps d'arrêt intrinsèques, nommés également « temps d'arrêt propres » et caractérisés par la *MTI* (moyenne des temps d'indisponibilité), seront relevés pour évaluer la disponibilité opérationnelle d'un système (voir § 6.2.3, figure 6.10).
– La disponibilité se traduit par *availability*, souvent notée $A(t)$ dans la littérature anglo-saxonne.

❑ Les différentes formes de disponibilité

La figure 5.42 schématise les différentes formes de disponibilité et leur contexte.

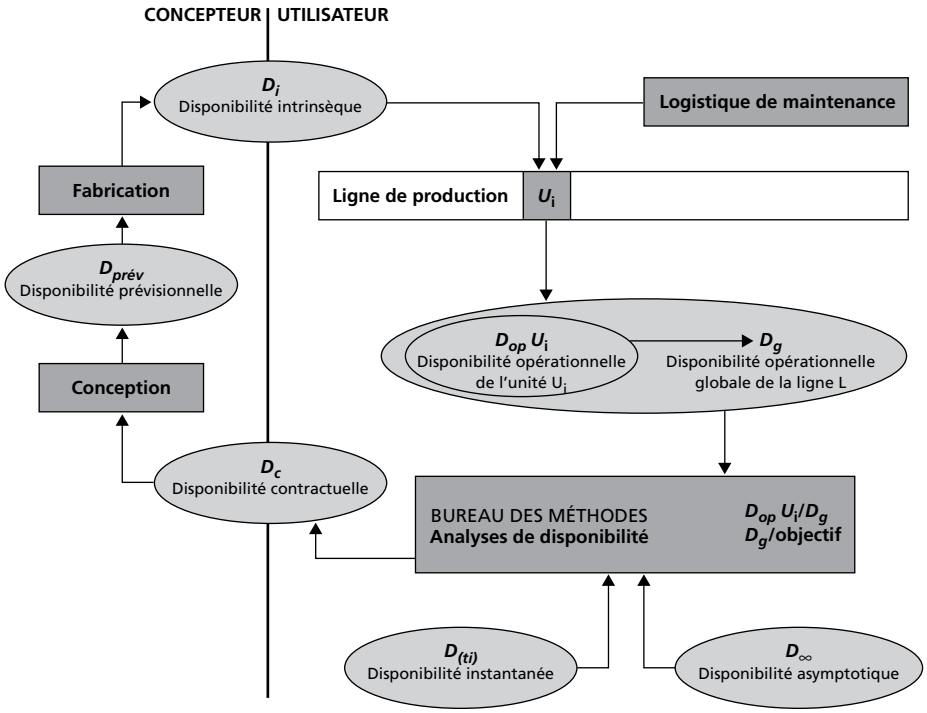


Figure 5.42 – Situation des différentes formes de disponibilité

☐ Disponibilité « propre » ou opérationnelle de l'unité de production U_i

Nous nommerons « disponibilité opérationnelle », notée D_{op}, l'évaluation de la disponibilité obtenue à partir de mesures de temps saisies à partir des états d'un équipement. Elle est évaluée à partir des relevés de temps relatifs :

– à une période de temps (1 jour, 1 semaine, *n* mois, 1 an) ;
– à un équipement ou, s'il s'agit d'une ligne de production, d'un tronçon U_i ;
– aux temps d'indisponibilité propres de moyenne *MTI* et des durées de bon fonctionnement de moyenne *MTBF* suivant le modèle :

$$D_{op} = \frac{MTBF}{MTBF + MTI} < 1$$

On obtient une valeur moyenne D_{op} mesurée sur un intervalle de temps Δt (d'une journée à un an).

La norme CNOMO E 41.50.520N distingue la disponibilité « propre », excluant les temps d'arrêt induits, de la disponibilité « opérationnelle » qui les intègre. *MTI* étant la moyenne des temps d'indisponibilité propre (voir figure 6.10), nous

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

confondons D_{op} et D propre, les temps induits se retrouvant pris en compte dans le *TRS* (taux de rendement synthétique) d'un équipement…

Cette disponibilité propre est un indicateur de gestion technique, spécifique à la maintenance. Elle suppose la prise en compte des microdéfaillances par saisie automatique des micro-arrêts et par imputation codée des causes intrinsèques d'arrêts, car elles représentent le gisement majeur d'amélioration de disponibilité.

Le suivi périodique de D_{op} permet de tracer des graphes d'évolution montrant l'efficacité des actions de maintenance (figure 5.43). Sa valeur absolue représente la résultante de la disponibilité intrinsèque D_∞ et de la logistique de maintenance qui est appliquée à l'équipement.

□ **Disponibilité opérationnelle globale, ou résultante (D_g)**

Cette disponibilité de ligne s'obtient par composition des D_{op} d'unités, suivant la présence et la valeur de stocks intermédiaires dits « stocks tampons » que la logique du flux tendu tend à supprimer.

Elle constitue un gisement d'amélioration de la productivité. À ce titre, elle représente un objectif de maintenance à atteindre suivant la conjoncture de la production (en surcapacité ou en limite de capacité). L'améliorer passe inexorablement par l'amélioration des $D_{op}(U_i)$ les plus faibles (voir étude de cas § 5.5.4).

□ **Disponibilité asymptotique ou intrinsèque (D_∞)**

Pour un équipement donné, il existe une limite de disponibilité $D_\infty = D$ au même titre qu'existe une limite de performance de production (temps de cycle ou cadence maximale) plus visible et mieux connue (capacité de production nominale du cahier des charges).

Cette disponibilité intrinsèque est une caractéristique initiale de l'équipement, de valeur difficile à « construire » a priori. Par contre, elle est la résultante de la prise en compte initiale des critères qualitatifs de maintenabilité et de fiabilité qui doivent figurer au cahier des charges de fourniture.

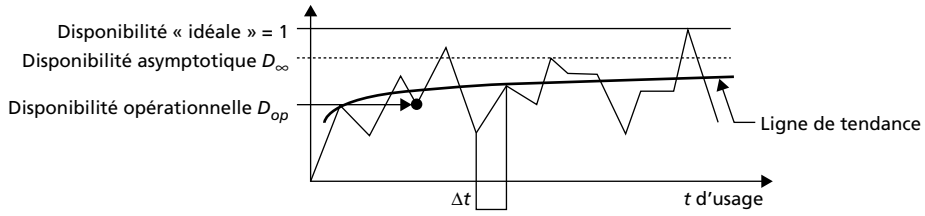


Figure 5.43 – Existence d'une limite de disponibilité D_∞

□ **Disponibilité instantanée ($D(t_i)$)**

Ce modèle probabiliste sera étudié au paragraphe 5.5.3. Il permet de démontrer l'existence d'une disponibilité asymptotique D_∞.

☐ Disponibilité contractuelle (D_c) et disponibilité prévisionnelle ($D_{prév}$)

Certains contrats de fourniture imposent une valeur allouée D_c qu'il appartient au concepteur de « construire » en réalisant une modélisation à partir des valeurs supposées (bases de données) de *MTBF* et de *MTTR*. Cette disponibilité prévisionnelle devra être confrontée à la disponibilité opérationnelle mesurée suivant des procédures précisées et acceptées par les deux parties fournisseur/utilisateur-client.

Exemple

L'un des premiers contrats de ce genre fut signé pour le métro de Caracas (Venezuela). L'AP (assurance de ponctualité, analogue à une disponibilité) était fixée a priori; à charge pour le fournisseur d'y parvenir dans un délai négocié.

5.5.2 Analyses de disponibilité opérationnelle

❑ Facteurs qualitatifs de la disponibilité opérationnelle

La disponibilité opérationnelle d'un équipement est la résultante de nombreux facteurs que nous avons succinctement identifiés et mis en famille suivant la figure 5.44.

❑ Analyses qualitatives d'indisponibilité

De façon analogue aux analyses qualitatives et aux expertises de pannes qui ont fait la preuve de leur richesse d'exploitation comme source de progrès, il est souhaitable de réaliser au bureau des méthodes des « analyses d'indisponibilité » paramétrées par les *MTI*.

Après avoir mis en mémoire, classé, puis sélectionné certaines indisponibilités critiques ou anormales (longues ou répétitives), nous analyserons l'indisponibilité à trois niveaux :

– 1er niveau, analyse de la défaillance à l'origine de l'indisponibilité. S'il s'avère possible de la guérir (maintenance proactive) ou de la prévenir (maintenance préventive), inutile d'aller au-delà. Sinon :

– 2e niveau : analyse des critères de disponibilité énumérés ci-dessus. Il s'agit alors d'opérer un diagnostic identifiant le ou les critères à l'origine des temps d'arrêt propres anormalement pénalisants. Puis de rechercher des améliorations qui peuvent être de nature technique ou organisationnelle;

– 3e niveau : analyse des conditions de l'intervention, ou de la série d'interventions, pour remettre en cause la logistique de maintenance et son organisation. Par exemple, l'analyse des 2 heures d'indisponibilité mettra en évidence 1 h 15 dédiée à la recherche interne (magasin), puis chez un distributeur voisin, de la pièce de rechange nécessaire.

L'analyse fine des temps d'arrêt propres est réalisée au paragraphe 6.2 « Analyse des temps ». La figure 6.10 est révélatrice du fait que la réduction des durées d'intervention passe par l'anticipation de tous les aléas que les techniciens sont susceptibles de rencontrer. Cette anticipation est de la responsabilité de l'agent des méthodes, à partir de l'analyse d'indisponibilité.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

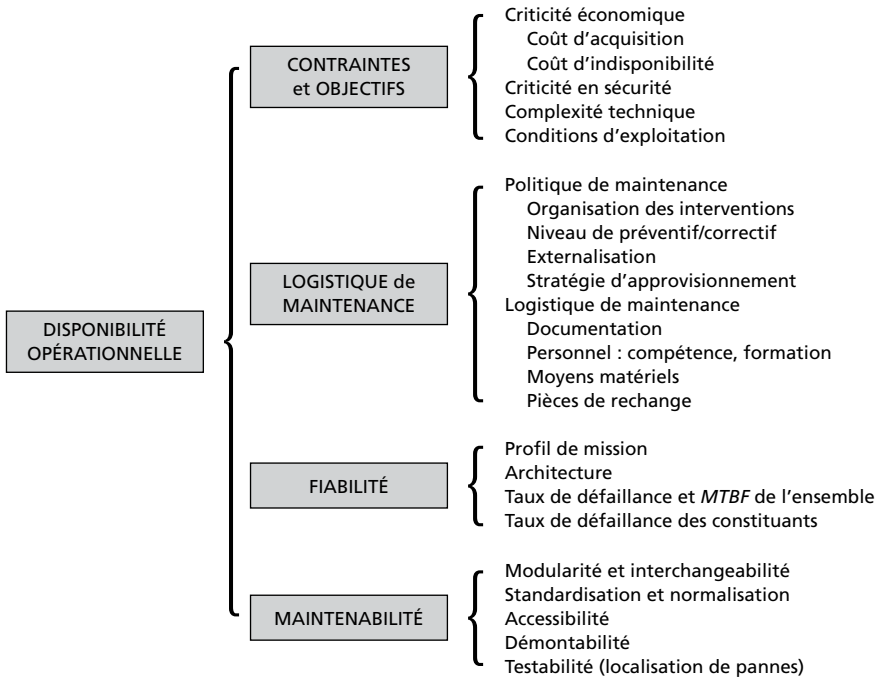


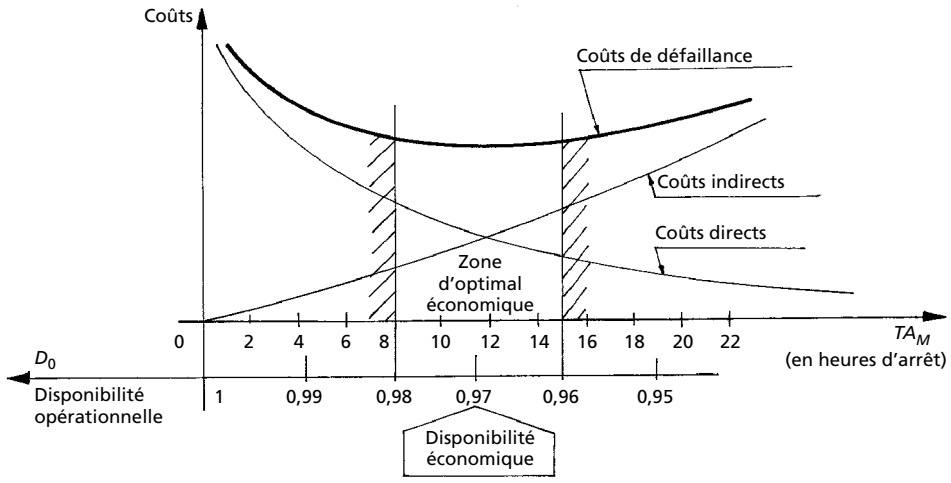
Figure 5.44 – Critères de disponibilité opérationnelle

❑ Approche économique de la disponibilité opérationnelle

La maintenance a la responsabilité de gérer la disponibilité opérationnelle d'un équipement suivant deux objectifs possibles :

– obtenir la meilleure disponibilité possible au moindre coût ou pour un budget fixé;

– obtenir une disponibilité performante, en mettant en œuvre la meilleure logistique de maintenance possible.



Bilan mensuel de l'unité F

Figure 5.45 – Aspect économique de la maîtrise de la disponibilité

L'environnement économique de l'entreprise et du produit concerné conditionne la politique à appliquer, donc l'objectif de disponibilité fixé à la maintenance.

Remarquons que la productivité d'un système passe par trois facteurs étroitement liés :

– la cadence de fonctionnement, limitée par la capacité de production du système ;
– la disponibilité opérationnelle de ce système, limitée par sa disponibilité intrinsèque ;
– la qualité des produits fabriqués, le pire scenario étant un système qui « débite » à grande cadence et sans arrêt des produits qui doivent être rejetés car non conformes.

La prise en compte de ces trois facteurs sera proposée dans le paragraphe 10.2 sur la TPM à partir de l'indicateur *TRS,* taux de rendement synthétique.

Remarque

La maîtrise « technique » de la disponibilité d'un équipement suppose une organisation rationnelle de la maintenance, une logistique performante et une grande réactivité (cas du changement d'objectif).

❑ Différents modèles d'évaluation de la disponibilité opérationnelle

L'évaluation de la disponibilité opérationnelle d'un équipement a un rôle d'indicateur de gestion plus que de ratio comparatif. À ce titre, il est plus intéressant en valeur relative pour comparaison à lui-même dans le temps (graphe d'évolution) qu'en valeur absolue, souvent suspecte : quels sont les temps saisis ? À la limite, peu importe les temps saisis pourvu que ce soient toujours les mêmes et que les microdéfaillances y figurent !

Beaucoup d'indicateurs sont donc possibles, par temps cumulés (*TCBF*, *TCTR*), par moyenne statistique ou, mieux, par espérance mathématique (*MTBF* et *MTTR*). Prenons quelques exemples d'indicateurs de disponibilité opérationnelle.

Formule de base de la disponibilité opérationnelle « propre » :

$$D_{op} = \frac{MTBF}{MTBF + MTI}$$

MTI : moyenne des temps d'indisponibilité (voir § 6.2.3) :

$$D_{op} = \frac{MTBF + RT}{MTBF + MTTR + MTL}$$

MTL : moyenne des temps logistiques (ou/et administratifs).

RT : *ready time* ou temps moyen d'attente, le système étant prêt à fonctionner :

$$D_{op} = \frac{MTBM}{MTBM + MMT}$$

MTBM : temps moyen entre actions de maintenance préventives ou correctives.

MMT : temps moyen des actions préventives et correctives :

$$D_{op} = \frac{T_O - T_{Ap}}{T_O}$$

T_{Ap} : temps cumulé d'arrêts propres.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

T_O : temps d'ouverture d'une ligne ou temps requis :

$$D_{op} = \frac{TMc \cdot N}{TMc \cdot N + T_{Ap}}$$

$TMc \cdot N$: temps moyen de cycle × nombre de pièces produites.

T_{Ap} : temps cumulé d'arrêts propres.

D'autres indicateurs sont envisageables, soit « forcés » par l'utilisation des seules données disponibles, soit mieux adaptés à un champ opérationnel particulier. Rappelons que leur structure doit être telle que $D_{op} < 1$, c'est-à-dire A – B/A ou A/A + B.

❑ Modes de saisie pour l'évaluation de la disponibilité opérationnelle

La saisie traditionnelle par BT (bons de travaux), par relevés de compteurs ou par feuilles de saisie documentée par un opérateur n'est pas pertinente pour évaluer régulièrement l'indicateur de disponibilité, qui doit obligatoirement intégrer les microtemps d'indisponibilité pour être significatif.

La saisie automatique en temps réel des arrêts de production est presque toujours disponible (gestion de production) par information des entrées-sorties du système de commande.

Par contre, il faudra mettre en place une saisie semi-automatique pour imputer chaque arrêt à un code recensant les *n* causes d'arrêt « propres » et les *m* causes d'arrêt induits par l'environnement du système.

L'imputation des feuilles de saisie par usage de codes-barres est envisageable.

Le redémarrage conditionné à l'imputation garantit que l'imputation d'un arrêt à une cause est réalisée, non qu'elle soit pertinente.

Un autre problème à maîtriser est le code « causes diverses » ou « autres causes » : il n'est pas facile de cibler des actions d'amélioration lorsque 66 % des arrêts ont des causes diverses non identifiées !

La qualité des saisies est donc un facteur prépondérant de la valeur de l'indicateur « disponibilité » et de l'efficacité des actions d'amélioration que l'on va en déduire.

5.5.3 Approche mathématique de la disponibilité

❑ Modélisation de la disponibilité instantanée. Formule générale

Nous nous plaçons dans l'hypothèse exponentielle, avec les deux taux λ et μ supposés constants et indépendants du temps :

Taux de défaillance : $\lambda = \dfrac{1}{MTBF}$

Taux de réparation : $\mu = \dfrac{1}{MTTR}$

La disponibilité instantanée d'un système réparable est de la forme :

$$D(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu+\lambda)t}$$

Démonstration

Soit la disponibilité instantanée $D(t) = p_0(t)$ = Prob (fonctionnement du système) = Prob (0 défaillance) et l'indisponibilité $I(t) = 1 - D(t) = p_1(t)$ = Prob (non-fonctionnement) = Prob (1 défaillance). La qualité initiale du système garantit que $p_0(0) = 1$ et $p_1(0) = 0$.
Par complémentarité : $p_{1(t)} = 1 - p_0(t)$.
Pour que le système fonctionne à l'instant $t + dt$ avec une probabilité $p_0\,(t + dt)$, il faut :
– qu'il fonctionne à l'instant t, et qu'il n'y ait pas de défaillance entre t et $t + dt$:

$$\text{probabilité} : p_0(t) \cdot (1 - \lambda dt)$$

– ou qu'il ne fonctionne pas à l'instant t, mais qu'il soit remis en état entre t et $t + dt$:

$$\text{probabilité} : 1 - p_0(t) \cdot \mu \cdot dt$$

Équation des probabilités :

$$p_0(t + dt) = p_0(t) \cdot (1 - \lambda dt) + (1 - p_0(t)) \cdot \mu \cdot dt$$

Si l'on divise par dt tendant vers 0, on obtient l'équation différentielle

$$p_0(t) + (\lambda + \mu) \cdot p_0(t) = \mu$$

dont la solution est :

$$D(t) = p_0(t) = \frac{1}{\mu + \lambda} \cdot \left[\mu + \lambda e^{-(\lambda+\mu)t}\right]$$

❑ **Expressions de la disponibilité asymptotique (ou intrinsèque, ou stationnaire)**

$D(t)$ tend vers une limite asymptotique D_∞ quand $t \to 0$. Nous trouvons alors les formules usuelles équivalentes :

$$D_\infty = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad \text{ou} \quad D_\infty = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

que l'on peut également mettre sous la forme :

$$D_\infty = \frac{1}{1 + \dfrac{\lambda}{\mu}} = \frac{1}{1 + \dfrac{MTTR}{MTBF}}$$

$\dfrac{MTTR}{MTBF}$ est appelé le « rapport de maintenance ».

❑ **Composition des disponibilités asymptotiques**

La détermination de la disponibilité prévisionnelle d'un système réparable s'appuie sur la méthode de l'espace des états, ou graphes de Markov : elle sort du cadre de cet ouvrage, dédié aux ingénieurs et techniciens en charge de la maintenance industrielle (voir [PAG 80] pour les calculs de fiabilité prévisionnelle). Nous ne donnerons que quelques résultats susceptibles d'être utilisés dans les cas les plus simples de détermination d'une disponibilité asymptotique « résultante » d'un ensemble de n unités.

Pour modéliser la disponibilité d'un système D_g à partir de la disponibilité DU_i de ses unités constitutives, nous devons distinguer deux cas :

1. les éléments sont statistiquement indépendants, ce qui est rarement le cas dans un atelier automatisé ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

2. les éléments sont statistiquement dépendants, ce qui est plus fréquent, car une dépendance fonctionnelle crée une dépendance sur les probabilités. Par exemple, les dépanneurs n'étant pas en nombre illimité, les unités simultanément en panne ne peuvent être simultanément dépannées.

☐ **Cas de *n* unités indépendantes en série**

La disponibilité globale, résultante du système, est le produit :

$$D_g = \prod_1^n DU_i$$

Exemple

Soient deux unités de disponibilités 0,90 et 0,80 en série. Alors :

$$D_g = 0{,}9 \times 0{,}8 = 0{,}72$$

☐ **Cas de *n* unités indépendantes en parallèle**

Notons l'indisponibilité $I = 1 - D$. Nous obtenons :

$$I_g = \prod_1^n IU_i$$

ou

$$1 - D_g = (1 - D_1)(1 - D_2)$$

Exemple

Soient deux unités de disponibilités 0,90 et 0,80 en parallèle. Alors :

$$1 - D_g = (1 - 0{,}9)(1 - 0{,}8) = 0{,}02$$

$$D_g = 0{,}98$$

☐ **Cas de *n* unités en série dépendantes**

Les résultats s'obtiennent en traçant le graphe des états discrets et en résolvant le processus de Markov.

$$I = 1 - D = \sum_{i=1}^{n} \frac{\lambda_i}{\mu_i}$$

☐ **Cas d'une redondance active de *n* unités identiques**

En considérant l'intervention simultanée de plusieurs réparateurs

$$I = 1 - D = \prod_{i=1}^{n} \frac{\lambda_i}{\mu_i}$$

d'après A. Villemur.

❑ **Composition des disponibilités opérationnelles**

☐ **Modèle « série » des lignes à unités liées (ou dépendantes)**

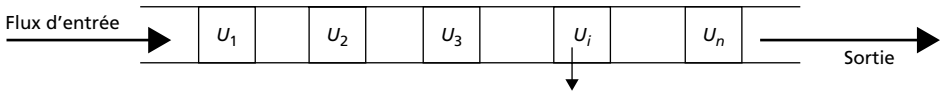


Figure 5.46

La disponibilité opérationnelle de la ligne sera dans ce cas :

$$D_g = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{DU_i}\right] - (n-1)}$$

Exemple

Soit une ligne de 10 unités, dont chacune a une disponibilité $DU_i = 0{,}99$. Alors $D_g = 0{,}908$. Supposons maintenant que 9 unités aient une disponibilité $DU_i = 0{,}99$ et que 1 unité ait une disponibilité $DU_i = 0{,}80$. Alors $D_g = 0{,}75$.

Cet exemple est riche d'enseignements, justifiant la méthode d'amélioration de performance d'un ensemble lié par le flux tendu : il faut et il suffit d'agir sur le « maillon faible », c'est-à-dire l'unité la plus pénalisante.

Il montre également l'intérêt qu'il y a à mettre en série des équipements de performances homogènes, un seul équipement performant au milieu d'équipements « moyens » étant inopérant (surqualité inutile).

Abaque

La formule donnant la disponibilité globale D_g a été mise en abaque correspondant au cas d'un grand nombre d'équipements de disponibilités homogènes.

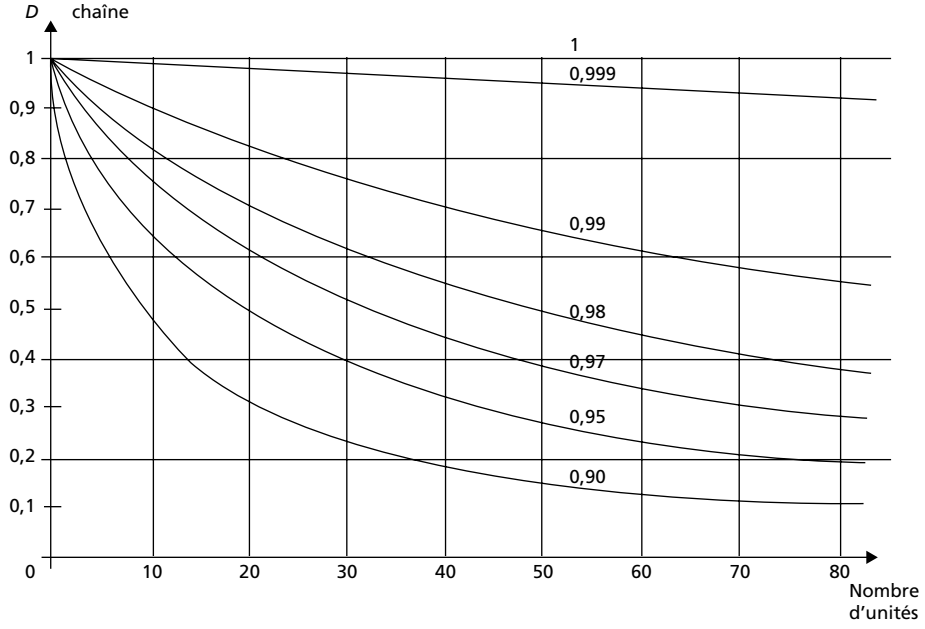


Figure 5.47 – Abaque donnant la disponibilité globale d'une ligne à unités liées

Lecture et utilisation de l'abaque

Si 50 unités ont une disponibilité $DU_i = 0{,}97$, la disponibilité opérationnelle D_g sera de 0,40. En lecture inverse, pour obtenir l'objectif $D_g = 0{,}6$ minimum avec 30 unités de production, chaque unité devra avoir une $DU_i = 0{,}978$ minimum.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Cela permet d'intégrer à une ligne existante un équipement nouveau dont la disponibilité « contractuelle » sera fixée à 0,98, mesurée dans des conditions à préciser. Ni plus, car ce serait de la « surqualité » inutile. Ni moins, car ce serait pénalisant pour tenir l'objectif $D_g > 0{,}6$.

□ **Modèle série des lignes à « dépotage-rempotage » (ou stocks tampons)**

La figure 5.48 montre que l'arrêt temporaire de U_2 entraîne le stockage des produits en S_{12} et le dépotage de S_{23}.

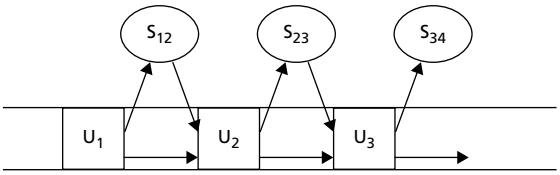


Figure 5.48

Dans ce cas simple, si le dimensionnement des stocks est suffisant, les unités deviennent indépendantes et la disponibilité globale est égale à la disponibilité DU_i la plus faible. Comme pour les unités liées, l'amélioration de la disponibilité globale passe par l'amélioration de la DU_i la plus faible.

5.5.4 Démarche d'amélioration de la disponibilité d'une ligne de production

La démarche proposée synthétise l'étude de cas traitée au paragraphe 5.5.5 suivant.

❑ **Objectif**

L'objectif est d'obtenir une amélioration permanente de la disponibilité d'une ligne de production à partir de l'organisation d'un flux d'informations « bouclées » entre le terrain (opérateurs pour la saisie), le bureau des méthodes (analyses d'indisponibilité et propositions) et le terrain (techniciens de maintenance pour la mise en œuvre des améliorations). L'analyse des retours d'expérience permet de mesurer l'efficacité des mesures prises et mises en œuvre.

Il est évident que cette organisation peut s'inscrire dans une démarche participative, chaque acteur étant informé et sollicité, les résultats de l'effort collectif (graphes d'évolution) étant « visualisés » sur le site. L'agent des méthodes est alors naturellement l'animateur de cette organisation reposant sur les analyses collectives d'indisponibilité.

❑ **Organisation de l'itération du flux d'informations et des actions d'amélioration**

Soit une ligne de production L décomposée en n tronçons ou unités liées.

□ **Saisie**

Chaque unité est décomposée en k sous-ensembles codés de 01 à k, servant à localiser les défaillances. Outre cette codification de « localisation », est établie une

codification d'imputation des 11 causes d'arrêt propre les plus fréquentes, plus un code 12 « autre cause ».

À chaque arrêt d'unité U_i sont relevés les *TBF*, les *TI* (temps d'arrêt propres) et les temps d'arrêt pour causes externes, non pris en compte pour évaluer DU_i.

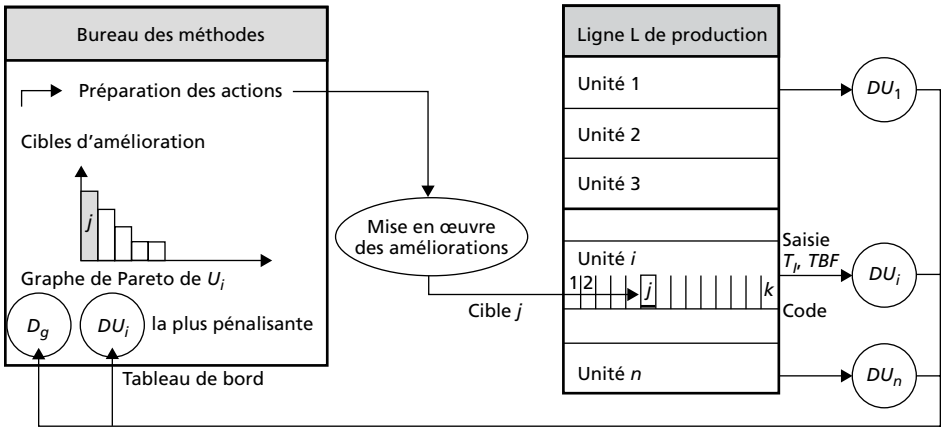


Figure 5.49 – Optimisation de la disponibilité d'une ligne de production

☐ Traitement

Les *TBF* et les *TI* permettent d'estimer périodiquement les *MTBF* et les *MTI* (moyenne des temps d'indisponibilité propre), puis de former et d'évaluer la valeur moyenne de $D_{op}\ U_i$ sur une période donnée (1 jour, 1 semaine) :

$$D_{op}U_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTI}$$

Par composition des DU_i, il est possible de tenir un graphe de tendance montrant les variations de D_g (formule des unités liées), comme le montre le tableau 5.18 ci-contre.

Les saisies ainsi que les traitements peuvent être manuels pendant une phase expérimentale, puis automatisés, l'agent des méthodes gestionnaire de la ligne ayant automatiquement les valeurs de toutes les $D_{op}\ U_i$ à l'issue de chaque journée.

☐ Interprétation du retour d'expérience

L'agent des méthodes analyse chaque semaine les tendances des DU_i les plus faibles, par rapprochement avec les valeurs des semaines précédentes. Sélectionnant la plus faible, donc celle qui pénalise le plus D_g, il doit tracer les trois graphes de Pareto en NT, N et T suivant la figure 4.24 de façon à diagnostiquer les causes d'indisponibilité en allant sur le terrain (dialogue avec les opérateurs).

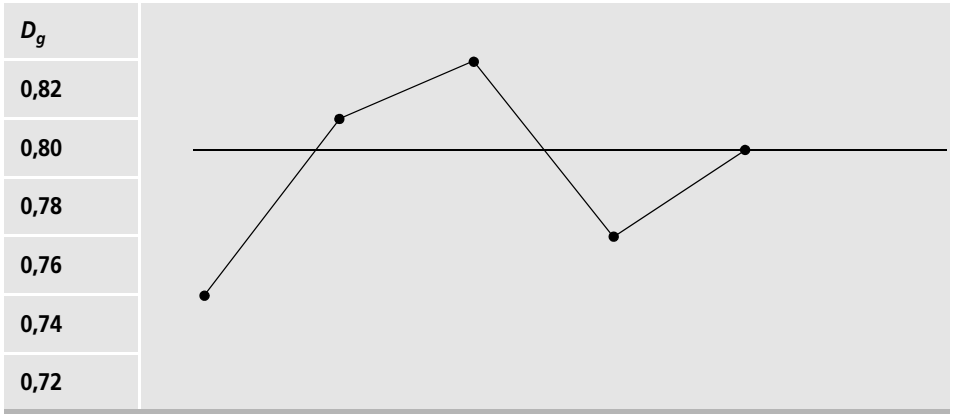
© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

□ Préparation et validation des actions

Cette analyse permet de cibler des actions d'amélioration qu'il reste à préparer, à mettre en œuvre et à valider : la mesure de DU_i de la prochaine période permettra de mesurer l'efficacité des actions réalisées.

Tableau 5.18 – Exemple de suivi de la ligne L

Semaines	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	
Unité U_i						
Compteur	623,3 h	751,5	861,1	993,7	1 109,8	
MTBF	22,2	27,5	28,9	24,5	36,1	
MTI	1,9	2,2	1,1	1,6	2,3	
$D_{op}U_i$	0,921	0,926	0,963	0,938	0,940	
Ligne L D_g	0,754	0,810	0,821,12	0,769	0,798	



□ Conséquence

L'application de ce principe de gestion technique débouche sur une recherche permanente de progrès, chaque problème résolu laissant apparaître de nouvelles sources d'indisponibilité, de moins en moins pénalisantes. Cet effort de la maintenance pour accroître la disponibilité a un coût : l'indisponibilité également.

5.5.5 Étude de cas : gestion technique d'une ligne de production

Le choix de ce thème et son traitement ont une volonté « pédagogique » d'aide aux responsables des méthodes de PMI dans une démarche rationnelle intégrant et démystifiant l'approche fiabilité.

❑ Contexte et objectif de l'étude

Cette étude de cas est tirée d'une expérience de recherche de la maîtrise de la disponibilité opérationnelle d'une ligne de production d'un process de transformation laitier (PMI agroalimentaire de 350 personnes). Les machines (homogénéisateurs, écrémeuses, pasteurisation, emballeuses) étaient homogènes (4 à 6 ans d'âge), placées en série et dédiées à un seul produit fromager.

Lors de l'étude, la demande du produit était en forte croissance, la capacité de production devenant insuffisante. L'objectif était donc d'améliorer la disponibilité, initialement faible et non mesurée, en proposant un modèle d'organisation en « manuel », en le validant puis en l'automatisant. L'organisation préconisée a été expérimentée pendant trois mois, puis validée et pérennisée avec saisie par code-barres et formation d'un agent des méthodes.

> **Remarque**
>
> Depuis lors, la demande ayant faibli, l'objectif est devenu de faire tourner cette ligne au moindre coût.

❑ Données de départ

- Engagement de la ligne : 16h/jour ouvrable + 9 h le samedi = 89 h/semaine.
- Dossier machine « constructeur » de chaque unité.
- Relevé des seuls temps d'arrêt *TA* > 15 min fourni par la production pour les six derniers mois.
- Bons d'intervention « lacunaires » relatifs aux interventions correctives : description du travail et durée d'intervention *TTR*.
- Un chef de service et des techniciens d'intervention, mais pas de « méthodes de maintenance ».
- Possibilité de former une équipe VSD (vendredi, samedi, dimanche) en maintenance avec des techniciens volontaires.

❑ Décomposition structurelle du process et saisie de données

La ligne L a été décomposée en 11 machines liées en série suivant la figure 5.50.

Figure 5.50

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Très vite, il est apparu que l'unité F limitait la production par des arrêts divers, assez longs et répétitifs. Chaque machine a été décomposée en sous-ensembles fonctionnels codés de 01 à 12 suivant la technologie propre à chaque unité. De plus, un second code de 01 à 12 a été proposé, en concertation avec les opérateurs et dépanneurs, correspondant aux « causes » apparentes d'arrêt les plus fréquentes :

01 à 06 : causes externes (matières, qualité, induits, etc.) ;

07 à 12 : arrêts propres à l'unité, à saisir même s'il s'agit d'un « micro-arrêt » < 1 min.

❑ Analyse de la fiabilité de l'unité F

Cette étude initiale a été menée à partir des seules données existantes : chronologie complète de 19 interventions correctives sur les 6 mois précédents (soit 2 314 h de fonctionnement), avec saisie des seuls temps d'arrêt > 15 min.

TBF	70	282	25	187	45	308	35	17	86	111	51	7	214	9	101	402	120	29	136
TA		3	7	12	1,5	2	8	0,5	3	2,5	11	3,5	1,5	4	0,5	8	5	2	4

Figure 5.51

L'unité F a été choisie a priori comme l'élément pénalisant le plus la disponibilité de la ligne. L'approximation de $F(i)$ est faite à partir des rangs médians :

$$F(i) = \frac{i - 0{,}3}{N + 0{,}4} \text{ avec } N = 19$$

☐ Tableau de valeurs et graphe de Weibull

Tableau 5.19 – Valeurs et graphe de Weibull

TBF	*i*	*F*(*i*)
7	1	3,6
9	2	8,8
17	3	13,9
25	4	19,1
...	...	...
282	17	86,0
308	18	91,0
402	19	96,4

Les couples de points (*TBF*, *F*(*i*)) sont reportés sur un papier fonctionnel de la loi de Weibull (figure 5.52).

Les paramètres de Weibull sont : $\gamma = 0$ (droite Dw), $\beta = 1$, $\eta = 125$ heures et *MTBF* = 125 heures. Nous sommes dans un cas particulier de la loi de Weibull, avec $\beta = 1$, pour lequel la loi exponentielle s'applique. Remarquons que ce résultat était prévisible, l'unité F de 4 ans étant en période de « maturité » bien qu'ayant un taux de défaillance fort ($\lambda = 1/\eta = 1/125$ panne durable/heure). Aucun mode de défaillance prédominant existe, les défaillances se produisant de façon aléatoire.

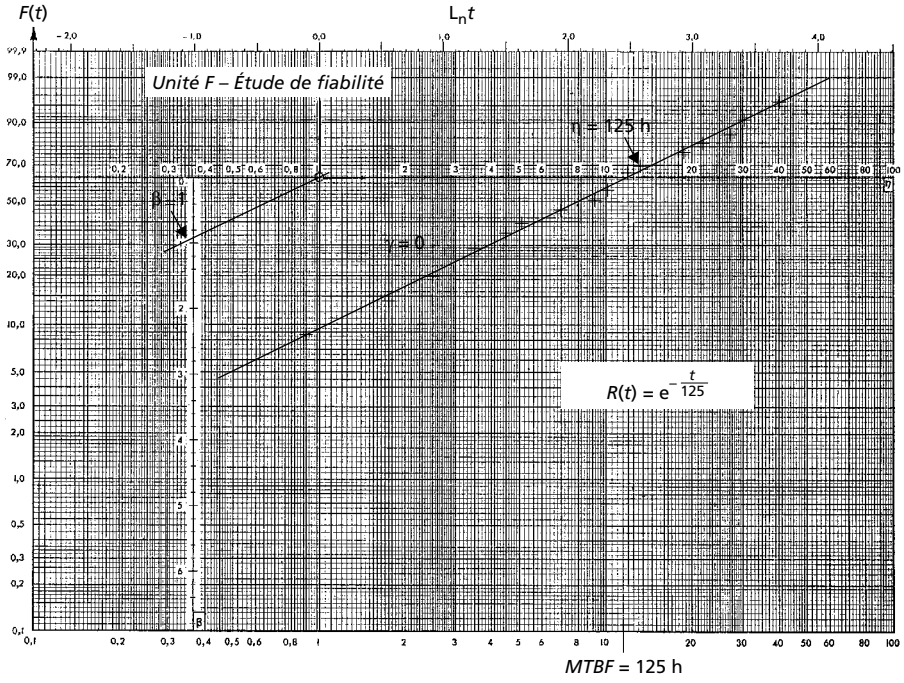


Figure 5.52

☐ **Loi exponentielle (à titre d'exemple et de vérification)**

Tracé du nuage de points sur papier semi-logarithmique (figure 5.53 ci-contre).

❑ **Analyse de la maintenabilité de l'unité F**

À partir des données existantes (durées d'arrêt), nous allons calculer la durée moyenne *MTA* de l'échantillon :

$$MTA = \frac{\sum TA}{N} = \frac{79}{18} = 4{,}4 \text{ heures}$$

ce qui caractérise bien des pannes durables.

Remarquons qu'une analyse probabiliste de la maintenabilité reste possible, la médiocre qualité des données disponibles dans notre cas la rendant inutile.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Analyse de la disponibilité de l'unité F

En fonction des données disponibles (lacune dans l'archivage des *TTR*), nous prendrons comme modèle de disponibilité opérationnelle :

$$D_{op}U_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTA} \text{ donc } D_{op}F = \frac{125}{125 + 4{,}4} = 0{,}966$$

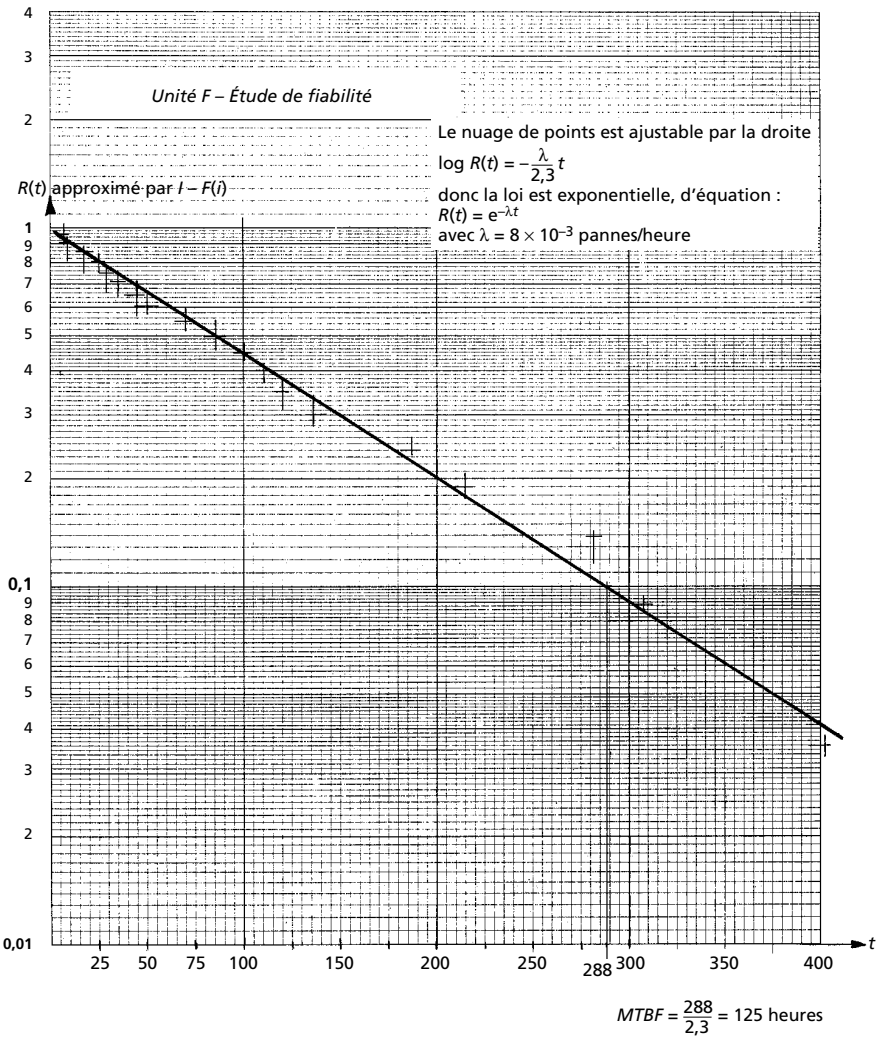


Figure 5.53 – Loi exponentielle

Il est évident que cette disponibilité est très largement optimiste, les durées courtes ou très courtes d'arrêt (*TA* < 15 minutes) n'étant pas prises en compte. Cette saisie des micro- et miniarrêts est évidemment prévue pour l'organisation préconisée.

❑ Analyse de la disponibilité globale D_g de la ligne

Soit D_{op} U_i notée D_i la disponibilité opérationnelle de l'unité U_i. Ces unités étant liées, la disponibilité globale de la ligne L est donnée par :

$$D_g = \frac{1}{\sum \frac{1}{D_i} - (N-1)}$$

Nous avons 11 unités en ligne : N = 11

$$D_g = \frac{1}{11{,}123 - 10} = 0{,}89$$

Tableau 5.20 – Analyse de disponibilité D_g d'une ligne de production

Ligne L période du 1/1 au 1/7				
Unité	**Moyennes calculées**			**1/D_i**
	MTBF	***MTA***	***D_i***	
A	350	4,7	0,987	1,013
B	845	1,3	0,998	1,002
C	385	3,6	0,991	1,009
D	25	0,3	0,988	1,012
E	820	2,0	0,998	1,002
F	125	4,4	0,966	1,035
G	170	0,6	0,996	1,004
H	325	1,1	0,997	1,003
I	30	0,8	0,974	1,027
J	1 710	4,5	0,997	1,003
K	250	3,2	0,987	1,013
			Σ1/D_i	11,123

Pour les 6 derniers mois d'activité, la disponibilité opérationnelle de la ligne a été $D_g = 0{,}89$, valeur que nous savons être trop optimiste ($TA > 15$ min). Cette valeur a pour intérêt de donner une valeur de référence pour comparaison :

– à elle-même, par intervalles successifs de temps, pour établir un graphe d'évolution,

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– avec les D_g d'autres lignes semblables, à l'intérieur de l'entreprise ou à l'extérieur,
– avec un objectif de disponibilité donné.

Remarque

Six mois est une période trop longue. Un suivi hebdomadaire permet une meilleure gestion et une amélioration permanente.

❑ **Propositions d'organisation : exploitation du retour d'expérience**

□ **Organisation des saisies**

À chaque poste de conduite d'unité, une horloge enregistre l'alternance des temps de fonctionnement TBF et des temps d'arrêts, même très courts. L'unité ne peut redémarrer que si l'arrêt a été validé par l'opérateur par une double imputation :
– de la localisation : quel est le sous-ensemble codé concerné par l'arrêt ?
– de la cause : code 01 à 06 pour les causes d'arrêts imputables à la production, code 07 à 12 pour les causes d'arrêts « propres » imputables à la maintenance, code 00 pour les arrêts « autres causes ».

Cette codification est établie à partir d'une période d'observation (8 jours par exemple) pendant laquelle sont relevés manuellement tous les arrêts et sont identifiées leurs causes apparentes.

Pour les arrêts longs (> 15 min), un BT « traditionnel » rempli par le technicien de maintenance porte les paramètres quantitatifs et qualitatifs de l'intervention.

□ **Organisation de l'analyse hebdomadaire de disponibilité**

À partir de la D_g de la période précédente (tableau 5.20), l'agent des méthodes sélectionne la DU_i la plus pénalisante : dans ce cas $DU_F = 0{,}966$. Il extrait les valeurs relatives à l'indisponibilité de l'unité F : un programme informatique lui permet d'avoir directement le tableau (tableau 5.21) et les graphes de Pareto correspondants (figure 5.54).

Tableau 5.21 – Réalisation des graphes de Pareto

Unité F mois de mars	**Nombre d'arrêts *n***						**Temps moyen d'arrêt t (= Σ *t*/*n*)**						**Temps d'arrêt *nt* = Σ*t*/cause**						
Causes	01	02	03	04	05	06	01	02	03	04	05	06	01	02	03	04	05	06	Σ*t*
Sous-ensembles																			
01																			
02																			
03	7			2			12′			8′			84′			15′			99′
04																			
Etc.																			

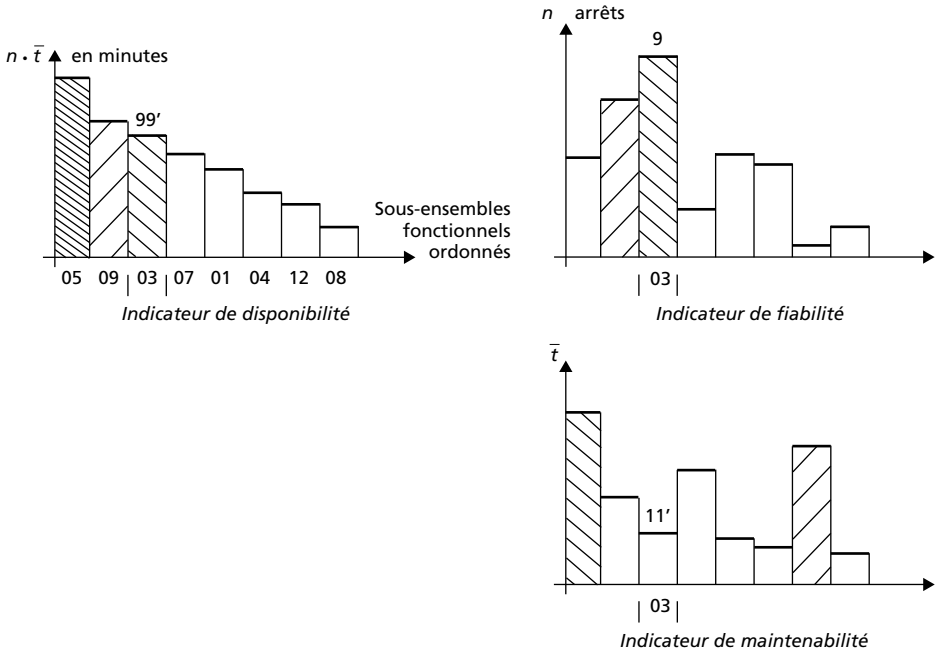


Figure 5.54 – Graphes de Pareto de l'unité F

Le graphe 1, relatif à la criticité des différents groupes fonctionnels de UF par rapport à l'indisponibilité, donne l'ordre « naturel » de prise en charge des problèmes : 05, 09 puis 03.

Prenons pour exemple le problème lié au sous-ensemble 03 : il a entraîné 99 minutes d'arrêt en 9 interventions de valeur moyenne 11 minutes, dont 7 arrêts sont dus à la cause 01, 2 arrêts à la cause 04. En l'occurrence, il s'agit de 7 pannes répétitives de cause « apparente 01 » identifiée, pour laquelle un diagnostic plus approfondi s'impose.

Quels sont les moyens de la supprimer ? Sinon, quels sont les moyens de réduire le nombre d'interventions, la durée d'arrêt, la durée d'intervention ?

Les solutions peuvent être de nature technique, mais également être liées à l'organisation de la production, de la surveillance de l'équipement ou de la maintenance.

□ Organisation des mesures d'amélioration

L'organisation peut se mettre en œuvre :

– dans un cadre traditionnel, l'agent des méthodes proposant, puis préparant des actions d'amélioration en concertation avec la production et les acteurs de terrain ;

– dans un cadre participatif sous forme de GAP (groupe d'analyse de panne) défini au paragraphe 10.5.3. Dans ce cas, l'agent des méthodes animateur du GAP hebdomadaire liste chaque semaine un certain nombre de problèmes à résoudre, justifie son choix et les propose au groupe. Lorsque la résolution d'un problème s'avère « lourde », un cercle de qualité formé de volontaires peut s'y attaquer pendant une période fixée.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Dans tous les cas, l'application de la démarche amène à une prise en charge hiérarchisée et progressive incluant des petits problèmes dont certains pourraient sembler négligeables, et donc n'être jamais résolus : « ça se dérègle, je règle, c'est en panne, je dépanne ».

Avec cette démarche de progrès permanent, il devient facile de cibler avec beaucoup de précision un problème dont nous sommes certains que la résolution ou l'amélioration entraînera un gain de disponibilité sur l'unité F, donc sur la ligne L. Chaque mesure d'amélioration sera validée par mesure de D_{op}, puis les résultats pourront être affichés sur le poste.

La démarche sera identique si, au lieu de se limiter à l'amélioration de la disponibilité (ce qui est l'objet de ce chapitre), nous l'étendons au taux de rendement synthétique de la ligne, qui intègre le taux de qualité et le taux de performance en plus du taux de disponibilité.

5.6 La fiabilité humaine : les erreurs à l'interface homme/machine

5.6.1 Réflexions préliminaires

« *L'erreur est inhérente à toute activité humaine.* »

« *L'homme est au cœur de l'activité maintenance.* »

Le rapprochement de ces deux truismes suffit à bien poser le problème. La maintenance repose sur un état d'esprit fait d'anticipation des pannes, des défauts, des accidents ainsi que des atteintes à l'environnement. Elle s'appuie sur une surveillance active des équipements. À ce titre, les hommes de maintenance sont facteurs de fiabilité par leurs réactions et leurs décisions d'action. Ils sont aussi porteurs de risque par leurs erreurs et les dysfonctionnements qu'ils peuvent provoquer. Erreurs de pilotage, de surveillance, d'analyse de situation, de diagnostic, de contrôle, de rédaction ou d'exécution de procédures.

❑ Le facteur humain de la conception à l'utilisation

Les systèmes automatisés, bien que sérieusement conçus à l'origine au moyen des techniques de la sûreté de fonctionnement, sont utilisés dans un environnement humain. Celui-ci est constitué d'utilisateurs grand public ou professionnels, de conducteurs, de régleurs, d'opérateurs, de dépanneurs, voire de saboteurs. Nous avons appris à anticiper et réduire certaines sources d'erreurs humaines, mais non à les éliminer totalement.

L'actualité mondiale nous montre que les catastrophes « technologiques », nucléaires ou aéronautiques, à travers les expertises faites a posteriori, ont toujours des niveaux de cause incriminant l'homme. De l'homme concepteur ou réalisateur à l'homme de maintenance ou à l'utilisateur.

Une caricature du décalage entre le soin apporté à la conception et le résultat opérationnel est donnée par l'automobile, dont les aspects sécuritaires sont poussés à l'extrême, dont on a éliminé la plupart des causes intrinsèques d'accident (plus de ruptures de freins ou de direction), dont la fiabilité intrinsèque est maîtrisée et

avec laquelle les usagers se tuent à déraison d'une ville moyenne par an en France. De quoi désespérer les fiabilistes de ce secteur !

Un autre exemple significatif concerne le matériel biomédical hospitalier, qui est généralement très fiable. Mais chaque ingénieur biomédical sait et vérifie chaque jour que plus de 60 % des pannes ont pour origine des erreurs d'utilisation des appareils : problème de culture, car à la légitime culture médicale ne correspond pas la nécessaire culture technique…

❑ **Fiabilité et sécurité**

L'accident généré par un système est le plus souvent l'aboutissement d'une chaîne d'événements dont chaque maillon pris isolément apparaît comme mineur, et dont certains maillons sont des erreurs humaines.

La fiabilité humaine concerne « la capacité du technicien à accomplir une fonction donnée sur un système avec une probabilité de réussite associée à un risque d'erreur » (probabilités complémentaires). Les analyses de fiabilité humaine vont porter sur les modes de production de ces erreurs, aux fins de prévention et d'amélioration.

La sécurité concerne la maîtrise des risques d'accident. Les analyses de sécurité vont porter sur les conséquences de l'erreur humaine, en notant que toute erreur n'entraîne pas un accident, soit par nature ou soit parce qu'elle peut être « récupérable ».

Surtout, il est essentiel de noter qu'à l'interface « homme-système » l'homme ne doit pas être réduit à un « générateur d'erreurs », mais doit être considéré comme le moyen initial de concevoir un système sûr et comme le moyen ultime de récupérer et de maintenir la sûreté du système !

5.6.2 Essai de typologie des erreurs humaines

❑ **La défaillance humaine**

☐ **Classification des comportements humains liés à la prise de décision (avant l'action)**

Avant d'agir, le technicien confronté à un système est amené à prendre une décision. Cette décision préactive est le résultat d'une activité cérébrale (traitement d'informations) consécutive à la perception d'un signal. Trois types de comportement sont alors possibles (CET 93, p. 58) :

– le *comportement machinal*. C'est la reproduction réflexe d'une décision apprise, sans activité mentale réfléchie ;
– le *comportement procédural*. C'est une tâche coordonnée d'après des règles insuffisamment intégrées pour devenir machinales. Ce comportement caractérise une phase d'apprentissage ou d'adaptation ;
– le *comportement cognitif*. C'est un comportement reposant sur une activité mentale. Il est caractéristique de la démarche « diagnostic » précédée de la phase d'acquisition des symptômes et renseignements utiles au « traitement cérébral » du technicien.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

□ Réflexions sur la nature de l'erreur humaine

De la même manière que la défaillance d'un équipement doit être caractérisée avant d'être prévenue, il nous faut définir et classer les types d'erreurs humaines. L'erreur est la conséquence d'une « défaillance humaine » définie par Villemur, 1988, comme « la cessation de l'aptitude de l'opérateur humain à accomplir une mission requise ».

Du point de vue « système », un comportement humain est erroné quand il réduit ou a la possibilité de réduire la fiabilité d'un système. Il n'y a pas de différence « système » entre une vanne fermée par erreur de manipulation ou par perte d'énergie électrique. Ce sont donc les effets de l'action humaine sur les performances du système qui caractérisent l'erreur.

D'autres points de vue sont possibles, centrés sur l'activité mentale (cognitive, psychologie, physiologie) et ses dérèglements, mais ils sortent du cadre de cet ouvrage. Rappelons cependant les phases de l'activité humaine : perception par les organes sensoriels, décodage, interprétation, diagnostic, décision par le cerveau, puis l'action résultante via la coordination motrice. Nous nommerons cette approche « perception-réflexion-action ». Notons que chaque étape peut être perturbée par des anomalies physiques, biologiques ou psychiques, sources potentielles d'erreurs. Prenons quelques exemples.

1. Limitations physiologiques de nos organes sensoriels : surdité, myopie, insensibilité tactile, etc.
2. Limitations psychosociologiques de nos réactions : stress, malaise, émotion, douleur subite, ingestion d'alcool, de drogue ou de médicament.

Il nous faut sortir du domaine de notre étude la faute, associée à une culpabilité, la malveillance, liée à la volonté de nuire, et « la main du diable », expression consacrée par les fiabilistes pour toutes les agressions que les utilisateurs « grand public » peuvent faire subir à un automatisme (du portillon de métro au distributeur de billets).

❑ Classement par rapport à l'approche « perception-réflexion-action »

– Erreur de perception : le stimulus, le signal ou l'information est non perçu ou mal perçu.
– Erreur de décodage : l'information bien perçue est mal interprétée, mal comprise ou mal transposée en information utile.
– Erreur de communication : altération de message (interférences), confusion (lisibilité, langue, vocabulaire, etc.).
– Erreur de représentation mentale : elle vient du décalage entre l'idée que l'homme se fait d'une situation et la situation réelle. Cette « erreur de diagnostic » est la cause majoritaire des défaillances graves de systèmes et des accidents.
– Erreur d'action : conséquence des précédentes, elle génère des actions non réalisées, mal adaptées, hors séquence ou non prévues.

❑ Classement par rapport à une procédure écrite

– Erreur d'exécution : l'action n'est pas exécutée en conformité avec les exigences prévues.

– Erreur d'omission : une partie de l'action prescrite est omise.
– Erreur de dérive : une action non prévue a été exécutée.
– Erreur de séquence : une sous-tâche est exécutée au mauvais moment.
– Erreur de délai : le temps alloué n'est pas respecté.

❑ **Classement par rapport à des mécanismes d'inattention**

– Erreur de mémoire : il s'agit « d'oublis » d'une action passée, en cours ou prévue.
– Erreur de discrimination : le déclencheur de l'action n'est pas correctement identifié, souvent par habitude d'une situation voisine, d'une fixation à un stéréotype.
– Erreur de substitution : l'opérateur substitue à une action adaptée une action ressemblante, mais inadaptée.
– Erreur de contrôle : l'action, ou son effet, n'est pas évaluée.

Toutes ces erreurs correspondent à des distractions, inattentions et lapsus débouchant sur des actions accomplies inconsciemment.

❑ **Classement par rapport aux « moteurs » de l'activité**

– Erreur de compréhension : le but de l'action et ses composantes ne sont pas assimilés.
– Erreur de non implication : la motivation est faible, donc la tâche est mal acceptée.

❑ **Classement lié aux causes d'erreurs**

– Erreur propre à l'opérateur : dysfonctionnement psychologique ou physiologique (stress, fatigue, malaise).
– Erreur propre à la tâche : inadaptation de la tâche aux capacités de l'opérateur, instructions insuffisantes, manque de formation, etc.
– Erreur propre à l'environnement : influence de tout ce qui est extérieur à l'homme en action, l'ambiance physique par exemple. L'analyse ergonomique a pour objet de réduire ces causes d'erreurs.

❑ **Classement spécifique aux erreurs de programmation**

– Erreur de syntaxe : non-observation des règles du langage.
– Erreur de sémantique : condition impossible à réaliser, malgré une syntaxe correcte.
– Erreur de copie : accident de négligence ou d'inattention.
– Erreur de logique : amène à des résultats incorrects dans les conditions du problème.

❑ **Classement spécifique aux erreurs de communication orale**

– Erreur d'interprétation : information ambiguë, incomplète, mal perçue.
– Erreur d'anticipation : on entend que ce que l'on s'attend à entendre.
– Erreur « d'humeur » : inconsciente, mais liée à l'antipathie ou à la tension entre communicants.
– Erreur de « barrière » : cas où le poids de la hiérarchie fait hésiter à communiquer.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

5.6.3 Notion de fiabilité sociotechnique

L'analyse d'une défaillance-système peut conduire à l'analyse d'erreur humaine. Au point de vue méthodologique, l'analyse d'erreur possède la même potentialité d'amélioration que l'analyse de défaillance. Les mêmes possibilités d'analyse qualitative à partir d'une erreur identifiée, ou d'analyse quantitative statistique à partir d'une collecte de renseignement existent. Nous pouvons puiser dans la littérature les analyses statistiques consécutives le plus souvent aux accidents, montrant les enchaînements de causes produisant l'accident. Mais la difficulté de réaliser ces analyses est grande dès lors que l'on touche à l'humain, à sa complexité et à sa susceptibilité : imaginons l'organisation d'une collecte de paramètres relatifs aux erreurs des techniciens du service…

Pourtant, si la fiabilité a une dimension technique évidente, elle a aussi une dimension humaine incontournable. Nous pouvons parler de la fiabilité « sociotechnique » comme résultante des fiabilités humaines et techniques et comme fiabilité opérationnelle vraie.

❑ Conditions initiales

En maintenance, l'hypothèse de départ de la fiabilité s'écrit $R(t = 0) = 1$. Le système fonctionne à l'origine. Nous allons définir une condition initiale analogue pour la fiabilité humaine : « le technicien est capable de réaliser la fonction F sur le système », sachant qu'il s'agit le plus souvent de tâches non répétitives par nature. Il a donc les connaissances et la formation requises, ainsi que les moyens adaptés à la tâche considérée. Mais il n'est pas à l'abri d'une défaillance humaine.

❑ Génération de l'erreur en maintenance

À partir de cette condition initiale, la fiabilité humaine a pour objet d'étudier la dégradation possible de cette capacité dans le temps, voire la perte brutale de cette capacité. Cette potentialité de génération d'erreur concerne chacune des fonctions de la maintenance, auxquelles nous avons affecté un exemple d'erreur caractéristique.

1. La conception et la réalisation des équipements (erreurs situées en amont de l'exploitation, mais essentielles, tel un défaut-matière non détecté par exemple).
2. La définition, le choix et la négociation d'investissement d'équipement (omission de certains critères de maintenabilité en particulier).
3. La préparation des opérations et la rédaction des procédures de maintenance, correctives ou préventives (analyse insuffisante des conditions de sécurité).
4. La surveillance des équipements (manque de vigilance quant à l'apparition de symptômes).
5. L'action technique en temps réel (faux diagnostic en dépannage) ou l'action « lourde » de type révision (erreur d'exécution technique) et leur contrôle (non prévu).
6. Les saisies et les rapports d'activités (paramètres faux ou rapport mal écrit, donc difficile à exploiter).

À chacune de ces fonctions correspondent des types d'erreurs caractéristiques, qu'il faut avoir à l'esprit lors des phases de préparation du travail en particulier :

c'est à ce niveau que l'anticipation de l'erreur est la plus efficace. Un bon préparateur est celui capable d'anticiper les difficultés techniques et logistiques, bien sûr, mais surtout de prévenir les erreurs de comportement de ses techniciens, de façon quasi personnalisée.

Nous pouvons donc dire qu'*une procédure ou une préparation doit être un « filtre » à erreurs et à difficultés.*

❑ Situation de l'erreur dans le cas d'un travail préparé

Nous allons étudier la situation de l'erreur entre les phases de préparation et de réalisation, entre la tâche prescrite et l'action réalisée. L'existence d'une procédure écrite ne garantit pas qu'elle est observée, l'opérateur se l'appropriant souvent par redéfinition et transformation. Remarquons que la formalisation d'une procédure est légitimement dépendante de la qualification de l'opérateur, allant de l'indication d'un objectif global au mode opératoire détaillé sans liberté d'initiative.

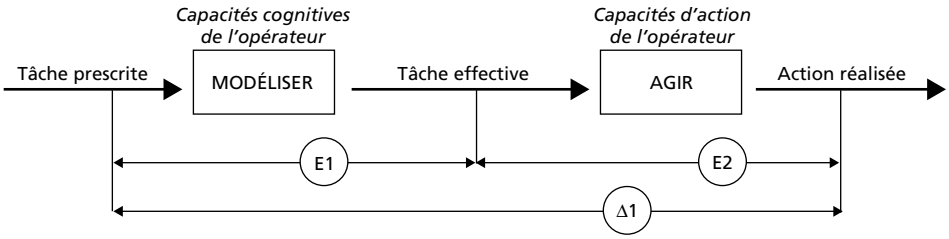


Figure 5.55 – Les erreurs d'interprétation et d'exécution de l'opérateur

Δ_1 est l'écart entre la tâche prescrite et la tâche effective. La tâche prescrite est la représentation que le préparateur se fait de la situation d'intervention, la tâche effective est la tâche « redéfinie » que s'approprie l'opérateur.

E_1 représente l'erreur d'interprétation des prescriptions du préparateur.

E_2 représente l'erreur d'exécution de l'opérateur.

❑ Situation de l'erreur dans le cas d'une action non préparée : l'erreur de diagnostic

Ce scénario, caractéristique du dépannage, diffère du précédent par les possibilités d'erreurs de perception venant de la phase d'observation (entrées sensorielles), à savoir l'inattention et le piège de l'habitude. Le travail « cognitif » du dépanneur est plus complexe, car il lui faut identifier la situation, interpréter les symptômes, les évaluer, rechercher une association avec un état ou des règles connues afin de décider d'une action. Remarquons que, dans ce cas, l'opérateur cumule les risques d'erreurs du préparateur et de l'opérateur, mais les risques liés à la communication et à l'interprétation des prescriptions sont en moins.

Dans ce cas, le dépanneur est souvent soumis à la pression du temps d'indisponibilité de l'équipement, le stress s'exerçant au détriment de la nécessaire lucidité. Il est

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

donc important d'inculquer l'idée que jamais l'urgence ne peut justifier le manque de réflexion, le manque de qualité, et encore moins l'accident !

5.6.4 Quelques remarques en guise de conclusion

1. Face à une erreur identifiée, le comportement positif ne consiste pas à « chercher le coupable », mais à analyser l'erreur de façon à éviter sa réapparition (ne pas confondre erreur et faute). Comme la défaillance, l'erreur humaine analysée et admise est une source de progrès. Elle est aussi une condition d'apprentissage, la pratique de l'autodiagnostic et de l'autocorrection pouvant être à la base d'une « *pédagogie de l'erreur* ».

2. Nous venons de réfléchir sur la génération des erreurs au plan individuel. Des travaux de sociologues et de psychologues envisagent la dimension collective de l'erreur, soit sous la forme de l'influence du groupe sur le comportement individuel erroné, soit sous la forme d'erreur collective.

Il en est ainsi de la « *pensée de groupe* ». Groupe qui, par sa forte cohésion ou la personnalité de son leader, amène ses membres à nier des indices contraires à la pensée unique, à refuser des informations contraires à l'image préétablie de la situation et à pratiquer l'autocensure. Un management efficace doit donc pousser à une responsabilisation individuelle et collective sans culpabilisation, favorisant ainsi un état d'esprit de prévention.

3. L'organisation et le système d'information qui en découle, le respect de la réglementation et l'assurance de la qualité en maintenance sont autant d'éléments favorables à la détection et à la prévention des erreurs. Le management participatif, par la plus grande implication des acteurs qui le caractérise, est un facteur déterminant de limitation des erreurs humaines.

4. Encore une fois, nous insistons sur le fait que la plus efficace prévention des erreurs est celle effectuée *ab initio*. Les techniques de la sûreté de fonctionnement, dont l'APR (analyse préliminaire des risques) et la conception de systèmes tolérants par rapport aux erreurs et aux pannes (*falt tolerant systems*), sont de bons moyens d'anticipation des erreurs humaines, tout au long de la vie du système. Ces techniques ont fait la preuve de leur efficacité, dans les domaines nucléaires et aéronautiques en particulier. De plus, cette construction d'un « taux de confiance » doit entraîner moins d'anxiété, donc plus de lucidité chez les opérateurs. Il est prouvé (ACA 87, études de sûreté nucléaire) que plus les risques d'erreurs peuvent avoir de conséquences graves, plus le stress agit sur les acteurs qui en ont conscience, et plus l'occurrence d'erreur est grande.

Savoir que « *le risque 0 d'erreur humaine est une utopie* » montre la voie de la raison et justifie l'intérêt de ce chapitre pour un responsable de maintenance.

C

Les fonctions de la maintenance

6 • LA FONCTION MÉTHODES-MAINTENANCE

6.1 Rôle du service méthodes-maintenance

6.1.1 Fonctions opérationnelles du service maintenance

❑ **Classification des fonctions opérationnelles**

Nous proposons la classification schématique (figure 6.1).

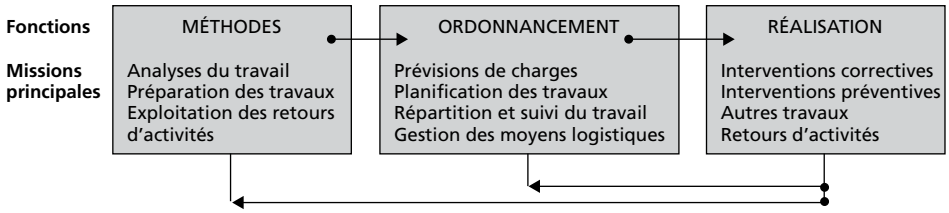


Figure 6.1 – Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance

La fonction méthodes est traitée dans ce chapitre, les fonctions ordonnancement et réalisation dans le chapitre 7.

❑ **Quelques remarques relatives à ces fonctions**

☐ **Effet d'échelle**

Il est évident que suivant l'effectif du service, la décomposition en sous-fonctions sera plus ou moins formalisée. Par exemple, dans les PME, l'ordonnancement et la logistique de maintenance sont souvent intégrés aux « méthodes ».

Dans une grande entreprise, des secteurs comme l'entretien général, la sécurité ou la gestion des rejets seront spécifiquement structurés. Dans une PME, ils seront rattachés à la maintenance et gérés par le bureau des méthodes.

Pour notre propos, peu importe le niveau de formalisation et d'effectif : l'approche est fonctionnelle, donc la fonction identifiée doit être remplie, que ce soit par le demi-service d'un technicien ou par une équipe de cinq agents. L'effectif des méthodes, suivant le secteur d'activité, est de l'ordre de 1/8 de l'effectif des intervenants.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ **Modèle d'organisation**

Le modèle d'organisation « méthodes-ordonnancement-réalisation » est naturel, en ce sens qu'il matérialise le modèle humain « œil-cerveau/système nerveux/main ». Il est itératif, donc compatible avec une gestion permettant l'amélioration permanente. Il est par ailleurs de structure semblable au modèle d'organisation de la production, bien que les contenus soient très différents.

Les *méthodes* sont caractérisées par les verbes d'action *savoir, analyser, prévoir, anticiper, améliorer.*

L'*ordonnancement* par les verbes *planifier, coordonner* et *synchroniser.*

La *réalisation* par les verbes *effectuer, vérifier* et *rendre compte.*

☐ **Écoute du client interne**

La maintenance doit être *à l'écoute des besoins de ses clients internes*, la production en étant le principal. Il est naturel que le service ordonnancement prenne en compte le planning d'activité de la production et que le service méthodes soit associé à ses problèmes de qualité et de performance. Pour certaines activités, la mise en concurrence avec des prestataires de services extérieurs peut engendrer une saine émulation afin de chercher à gagner en efficacité.

6.1.2 Champ des responsabilités des méthodes-maintenance

❑ **Richesse de la fonction méthodes-maintenance**

☐ **Promouvoir la maintenance, c'est développer les méthodes…**

La nécessaire mutation entretien-maintenance passe par la création et le développement d'un service méthodes non pléthorique, mais efficace. En effet, pour sortir du cercle vicieux de l'entretien, il est indispensable de prendre du recul par rapport aux actions de routine du terrain, de les mesurer, de les analyser, de les critiquer afin de proposer des améliorations. La position du bureau des méthodes au sein du service maintenance est stratégique :

– c'est le relais des politiques, des orientations et des projets à mettre en œuvre ;
– c'est le centre des ressources documentaires ;
– c'est la plaque tournante émettrice et réceptrice de la plupart des flux d'information du service maintenance ;
– c'est le centre de gestion des activités techniques, mais aussi de leur remise en cause ;
– c'est le pôle de proposition des actions d'amélioration.

Dans le cas de l'utilisation de l'outil GMAO, c'est le lieu privilégié de l'exploitation du système.

☐ **Le rôle de « faciliteur »**

La vocation première des méthodes est de faciliter les actions réalisées sur le terrain par anticipation des problèmes, afin de rendre ces actions plus efficaces, moins coûteuses, moins dangereuses et moins nuisantes.

À la différence des « méthodes-production », qui ont vocation à préparer des opérations, souvent répétitives, réalisées par des machines, les « méthodes-maintenance » préparent des interventions réalisées par des hommes et de façon rarement répétitive. Ce qui enrichit considérablement le nécessaire profil d'un agent des méthodes. Afin de mieux cerner le champ de responsabilités des méthodes, nous allons envisager le rôle joué par un agent des méthodes dans l'exercice de ses attributions.

❑ Rôle d'un agent des méthodes

□ Profil d'un agent des méthodes

L'agent des méthodes est à la base de la logique de la maintenance : acquérir la maîtrise des événements liés aux équipements. C'est un technicien polyvalent et généraliste, à la fois homme de bureau et de terrain. Il est souvent « sectorisé », c'est-à-dire spécifiquement attaché à l'un des secteurs d'activité de l'entreprise. De culture initiale technicienne, son expérience et des compléments de formation l'ont amené à prendre en compte et à concilier le champ réglementaire, le champ humain et le champ économique. Par exemple, un aspect caractéristique de son rôle est d'empêcher un mécanicien dévoué et compétent de passer 8 heures à remettre à niveau une pompe, pour un coût de 8 000 F, alors que la pompe neuve vaut 4 000 F !

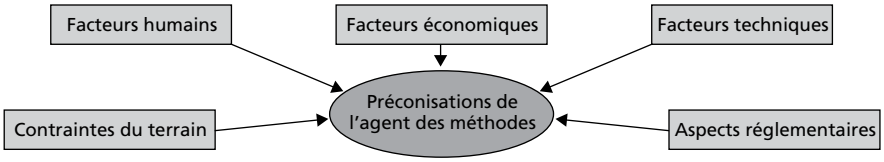


Figure 6.2 – La polyvalence de l'agent des méthodes

□ Domaines de responsabilité de l'agent des méthodes

Identification des domaines

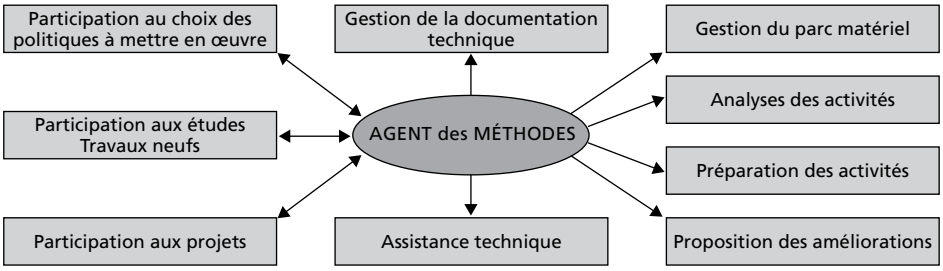


Figure 6.3 – Les domaines de responsabilité de l'agent des méthodes

Participation aux choix des politiques à mettre en œuvre

L'agent des méthodes est le relais naturel des objectifs choisis par l'entreprise. Meilleur rapport qualité/prix, plus de productivité se traduisent au sein de la main-

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

tenance par la mise en œuvre de politiques adaptées (voir § 9.1). En retour, les éléments rassemblés au bureau des méthodes permettent d'établir un tableau de bord de gestion indispensable aux responsables du service et de l'entreprise.

Participation aux études et travaux neufs

L'agent des méthodes sollicite le bureau d'études pour toute modification importante. En retour, sa compétence est requise pour la rédaction du cahier des charges (critères de maintenabilité, standardisation, etc.) et pour la définition des éléments de soutien logistique des équipements neufs.

Participation aux projets

Des projets structurants, comme le sont la recherche des certifications ISO 9000 ou 14000 ou le développement de la TPM, n'aboutiront que s'ils sont relayés et souvent pilotés par les agents des méthodes-maintenance.

Gestion de la documentation

Les dossiers techniques d'équipement (DTE), les plans de maintenance, les historiques, les fiches d'analyses de défaillances sont gérés (création, archivage, exploitation, mise à jour) au niveau du bureau des méthodes, avec l'aide de l'informatique.

Gestion du parc matériel

L'agent des méthodes a pour objectif la détermination de la criticité de chaque équipement, puis la maîtrise du comportement de chaque équipement : pour cela, il lui faut « mesurer » ses performances (*TRS*, disponibilité), déterminer les équipements dont le manque de disponibilité pénalise la production et améliorer leurs points faibles. Il doit déterminer le niveau de préventif à mettre en œuvre pour chaque équipement (plan de maintenance).

Pour les matériels périphériques non stratégiques ainsi que pour les installations, il a la responsabilité de la sous-traitance et des contrats de maintenance.

Analyses des activités

L'agent des méthodes a la charge du suivi des indicateurs de performance, de l'analyse des tendances et de la détermination des priorités d'action. Cela l'amène à prendre la responsabilité des analyses de défaillances, quantitatives et qualitatives. Il est l'animateur « naturel » des GAP (groupe d'analyse de pannes décrit au paragraphe 10.5.3). Il a aussi à analyser les interventions à travers leurs paramètres : nature, durée et temps d'arrêt, coûts directs et indirects, consommation de produit et de rechanges, etc.

La GMAO est naturellement un outil incontournable pour exploiter la base des données opérationnelles caractérisant les activités et leurs évolutions.

Toutes ces analyses sont à la base d'une démarche de progrès : savoir où nous étions et où nous sommes pour orienter les propositions d'amélioration : quelles sont les actions-cibles prioritaires ? Ces cibles peuvent être techniques, mais elles sont plus souvent dirigées vers une remise en question de l'organisation.

Préparation et contrôle des activités

La préparation est la vocation première des services méthodes : elle est développée de façon détaillée dans ce chapitre. Le rôle initial du préparateur est l'établissement des procédures permanentes caractérisant l'organisation interne du service et de ses relations d'interfaces (DT, OT, DA, BSM, saisies pour historiques et pour analyses).

– Pour la maintenance corrective, la préparation passe par une anticipation des risques encourus (le préparateur pense d'abord « sécurité »), puis par une anticipation des problèmes qui peuvent freiner l'intervenant (rôle de faciliteur).
– Pour la maintenance préventive, elle consiste à imaginer le plan de maintenance d'un équipement, puis d'évaluer son coût et son efficacité afin de l'optimiser progressivement.
– Pour la maintenance externalisée, la préparation consiste à définir les règles et les procédures destinées au prestataire choisi, puis l'agent des méthodes doit assurer « l'accompagnement » du prestataire lors de ses travaux sur site.

Notons que toute préparation d'une opération de maintenance n'est réaliste qu'à partir d'une bonne connaissance du terrain (au minimum par une observation *in situ*).

Un aspect complémentaire du rôle de l'agent des méthodes est le contrôle des actions définies dans les procédures. Cela dans une logique d'assurance qualité : il doit garantir la traçabilité des opérations effectuées.

Propositions d'améliorations

C'est la suite logique des analyses et des diagnostics : déterminer des cibles pour agir sur les causes, d'où la préconisation d'améliorations techniques et, le plus souvent, organisationnelles.

Quelles sont les causes d'un temps d'arrêt de production anormalement long ? Quelles sont les causes d'un gaspillage de temps d'intervention anormal ? La réponse habituelle est celle d'un manque d'organisation : préparation lacunaire, outillage non adapté, moyens non disponibles, pièce de rechange absente du magasin, etc.

Les améliorations concernent également les petites actions de routine (c'est en panne, je dépanne !), dont l'analyse quantitative montre le « poids » souvent sous-estimé, faute de mesures objectives.

Assistance technique sur site

L'agent des méthodes est un homme de terrain : il connaît parfaitement son secteur d'attache, les équipements et les hommes qui y travaillent. À ce titre, sa mission comprend :

– le soutien aux dépanneurs par l'aide au diagnostic et la maîtrise des expertises internes ;
– la formation des opérateurs, dans le cadre de l'automaintenance ;
– la réalisation d'audits internes préliminaires à des modifications d'organisation ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– la mise en œuvre par lui-même ou en sous-traitance de certains moyens spécifiques non intégrés : tests, mesures vibratoires, CND (dont la thermographie et les radiographies, rarement intégrées).

❑ **Conclusions**

Ce panorama simplifié des missions d'un agent des méthodes met en évidence la richesse et la diversité de sa fonction. Il doit être en phase avec la vie sur le terrain, mais il doit surtout *prendre du recul* par rapport à l'événement instantané, qui était seul pris en compte au temps de « l'entretien ». Quand il y a le feu dans la forêt, personne ne conteste l'urgence qu'il y a à l'éteindre. Mais c'est après que se fait le travail positif : détecter le foyer automatiquement à distance, nettoyer les sous-bois, tracer des pare-feu, lutter contre la pyromanie, etc.

La maintenance, par nature, n'est pas et ne sera jamais un centre de profit. Mais la réduction des coûts d'exploitation, la qualité des produits et la sécurité des salariés passent par une structuration efficace des méthodes-maintenance et par la promotion de la fonction « improductive (!) » des agents des méthodes.

6.2 L'analyse des temps de maintenance

6.2.1 La connaissance des temps de maintenance et leur classification

❑ **Temps-machine, temps d'activité humaine et leur association**

La maintenance a la spécificité de devoir maîtriser à la fois les *temps-machines* (alternance de temps de bon fonctionnement et de temps d'arrêt) et les *temps d'activité* de ses techniciens d'intervention. Suivant l'exploitation souhaitée, les uns et/ou les autres seront utilisés.

– *Les temps-machines* concernent les états successifs caractérisant la « disponibilité » et la « non-disponibilité » des systèmes. Pour ces temps, des saisies automatiques de dates et de durées ou des relevés de compteurs associés à des systèmes d'imputation des causes d'arrêt seront nécessaires.

– *Les temps caractérisant une intervention humaine* posent un problème de saisie beaucoup plus délicat analysé au paragraphe 6.2.2. Comme leur connaissance est aussi indispensable que la connaissance des temps-machines, un effort d'explication destiné aux techniciens est souvent nécessaire, avec ou sans GMAO.

– La maîtrise des temps précédents, résultant de la performance intrinsèque de l'équipement (fiabilité) et de la performance humaine associée aux arrêts (maintenabilité et logistique de maintenance), permet de gérer la maintenance de l'équipement à partir de l'analyse des causes d'indisponibilité et d'indicateurs.

❑ **Mesure des temps**

☐ **Problèmes d'unités de temps**

Le technicien habitué à manipuler des systèmes de mesures décimales est confronté à un système traditionnel de mesures moins confortable : an, semaine, jour, heure, minute, seconde. Ne pas confondre 1:30 h et 1,30 h… Son rôle est d'estimer les temps pour prévisions, puis de les mesurer pour enregistrement et analyse ultérieure.

Tableau 6.1 – Systèmes d'enregistrement des temps

Système sexagésimal	Système mixte	Système décimal
Heure	Heure	Heure
Minute	Minute	1/10 h
Seconde	1/10 min = 6 s	1/100 h = 1 ch = 36 s
1/10 s	1/100 min = 0,6 s	1/1 000 h = 1 mh = 3,6 s
1/100 s	1/1 000 min	1/10 000 h = 1dmh = 0,36 s

Il appartient à chaque entreprise d'adopter le système d'enregistrement des temps le mieux adapté à son activité et de se doter des moyens de mesures correspondant (voir tableau 6.1), sachant que l'analyse des cycles-machine peut exiger de descendre sous la seconde alors que l'analyse des activités de maintenance ne requiert pas de descendre sous le quart d'heure, exceptionnellement la minute ou le ch.

Pour les temps relatifs à l'organisation du travail et à la gestion, les unités sont : le jour, la semaine, le mois, l'année. L'unité à éviter est le *mois*, de durée variable et décalé par rapport au rythme de la vie sociale de l'entreprise.

Remarque

Les tâches de maintenance peuvent être très diverses : certains dépannages ne demandent que quelques secondes alors qu'un arrêt annuel d'unité peut comporter des milliers d'heures de travail.

☐ **Moyens de mesure des temps réalisés**

Pour la mesure des temps-machine, les systèmes de mesure sont le plus souvent intégrés (horloges, compteurs) et basés sur un référentiel absolu ou relatif (voir § 2.2.1). Ils utilisent parfois des unités de temps « indirectes », telles que le nombre de cycles, la tonne produite, le kilomètre parcouru, etc.

La mesure des temps d'activité repose sur l'autocontrôle des intervenants, le plus souvent au quart d'heure près. Le chronométrage et l'enregistrement vidéo, mal vécus, sont réservés à des travaux bien spécifiques de maintenance.

6.2.2 Temps d'activité humaine

❑ **Temps prévus, temps passés et temps relevés**

☐ **Pourquoi vouloir connaître les temps d'activité ?**

La maîtrise des temps d'activité de tous les techniciens de maintenance est à la base de la pyramide de la gestion d'un service de maintenance. Sans estimation de « temps alloués », pas de planification des activités internes ou externalisées. Sans estimation de temps, pas de coûts prévisionnels, donc pas de gestion prévision-

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

nelle. Sans relevés de temps passés, pas de coûts de maintenance, donc pas de gestion possible du budget. Sans relevés exacts des temps passés, pas d'analyses des activités, donc pas de proposition d'amélioration.

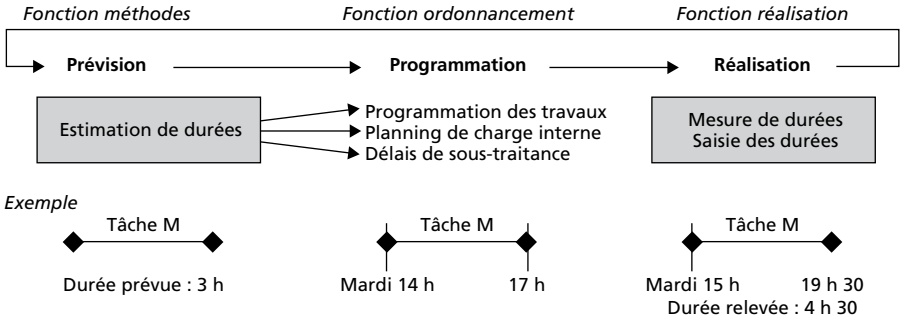


Figure 6.4 – Temps prévus, programmés, passés et relevés

☐ Les difficultés liées à l'obtention des temps passés

1. Face au problème de la traçabilité des temps, une grande méfiance subsiste, résurgence de l'époque taylorienne, lorsque les gens étaient payés à la pièce. Certes anachronique, cette méfiance pénalise encore parfois l'organisation des saisies des « temps passés », soit par une opposition systématique de principe soit par une incompréhension de l'objectif qui amène à fausser volontairement les saisies. Les « temps relevés » ne sont pas automatiquement les « temps réellement passés »…

2. Pour être exploités, les temps portés sur les BT manuels doivent être lisibles : ce n'est pas toujours le cas !

3. Autre problème, quel temps porter lorsqu'une opération corrective comporte plusieurs phases distinctes : observation *in situ*, diagnostic, préparation, dépose, intervention proprement dite, essais, etc. et que l'on a attendu 20 minutes que le magasinier trouve la pièce mal référencée ?

4. Enfin, lors de mini-interventions correctives, doit-on passer 10 minutes à saisir les paramètres d'une action de 2 minutes ?

Temps non relevés, erronés, incomplets, non homogènes, illisibles, etc. Trouver des parades à ces difficultés n'est pas mineur, car, sans la maîtrise des temps passés, l'édifice « gestion de la maintenance » s'écroule.

> **Remarque**
>
> L'utilisation d'une GMAO facilite la gestion des temps de maintenance, mais ne résout « automatiquement » aucune des difficultés précédentes.

❑ Nature des durées d'intervention de maintenance

☐ Norme AFNOR X 60-015 et projet CEN WI 319-003

Les temps de maintenance comprennent les temps de maintenance préventive et les temps de maintenance corrective. Ceux-ci comprennent les temps actifs et les temps annexes. Les temps actifs de maintenance corrective comprennent :

– temps de localisation de la défaillance,
– temps de diagnostic,
– temps de dépannage ou de réparation,
– temps de contrôle et d'essais finals.

Les temps annexes de maintenance corrective comprennent :
– temps administratifs (temps de saisie, de traitement de documents, etc.),
– temps logistiques ou durées d'attente des ressources nécessaires à l'exécution de la maintenance,
– temps techniques annexes (exemple : phase de refroidissement d'un équipement),
– temps de préparation du travail (études, méthodes, ordonnancement, etc.).

□ Chronologie des phases d'une intervention corrective « moyenne »

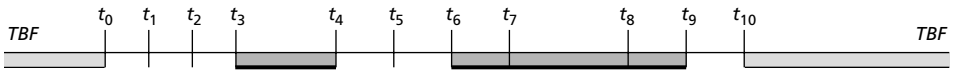


Figure 6.5 – Chronologie des temps actifs et annexes de maintenance

Observons les phases « en série » d'une Ic moyenne (figure 6.5) pour retrouver les durées de la norme AFNOR et les durées à saisir.

Avant t_0 et après t_{10} : durées de bon fonctionnement notées *TBF*.

$(t_0 - t_1)$: de l'émergence à la détection d'une panne.

t_1 : émission DT, demande de travail.

t_2 : accusé de réception ; la DT est enregistrée au service maintenance.

t_3 : prise en charge par un technicien disponible.

$(t_3 - t_4)$: tests, localisation, diagnostic, expertise.

$(t_4 - t_5)$: préparation de l'intervention, consignation, procédures de sécurité.

$(t_5 - t_6)$: programmation, attente d'approvisionnement.

t_6 : lancement de l'OT, ordre de travail.

$(t_6 - t_7)$: nettoyage, accès, dépose sous-ensemble.

$(t_7 - t_8)$: démontage et intervention proprement dite.

$(t_8 - t_9)$: remontage et repose.

$(t_9 - t_{10})$: essais, contrôles, réglages, déconsignation.

(t_{10}) : l'équipement est opérationnel (*TBF*).

Remarque

Les valeurs relatives de ces temps « en série » sont très variables suivant la nature des technologies défaillantes.

□ Quels temps faut-il saisir pour mesurer des *TTR* (*time to repair*) ?

Il semble logique de mesurer le temps de réparation par le temps « actif » de maintenance au sens de la norme. Mais dans ce cas, il faut effectuer une saisie double $(t_3 - t_4) + (t_6 - t_{10})$ alors que la réparation est caractérisée par $(t_7 - t_8)$ seulement.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Une réflexion interne consensuelle est nécessaire de façon à définir la « règle du jeu » acceptée et comprise par tous les techniciens d'intervention. En effet, ce temps servira de base à la valorisation de l'ordre de travail et à l'estimation de la *MTTR* indispensable à l'évaluation de la disponibilité de l'équipement.

❑ Analyse de maintenabilité : distribution des durées d'intervention

□ Hypothèses

Soit une intervention Ic réalisée *N* fois et connue par retour d'expérience (par exemple, le changement du disque d'embrayage sur une voiture V).

□ Allure de la distribution *g*(*t*)

L'histogramme des *TTR* et la fonction de distribution *g*(*t*) qui s'en déduit par lissage du polygone des fréquences (cas d'un grand échantillon) ont toujours la même allure, caractérisée par une dissymétrie forte entre les temps minimaux dits « optimistes » et les temps maximaux dits « pessimistes » comme l'indique la figure 6.6.

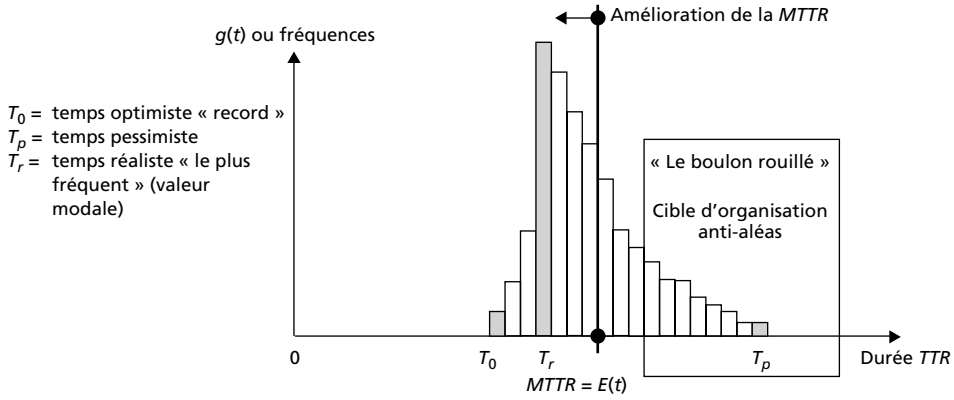


Figure 6.6 – Allure de la distribution des durées d'intervention

La *MTTR* est approximée par la moyenne statistique des durées mises en classes ou se calcule par l'espérance mathématique de la variable *TTR* lorsque l'on utilise une loi de probabilité (voir § 5.3).

□ Interprétations de la courbe

Cette courbe « naturelle » est très riche d'enseignements.

1. Elle est *naturelle* en ce sens qu'au-delà des durées d'interventions de maintenance elle illustre un grand nombre d'activités humaines, caractérisées par la dissymétrie entre le « ça va bien » et le « aujourd'hui, tout se passe mal » ! En maintenance, elle illustre l'argument caricatural, mais bien professionnel et très réaliste du « boulon rouillé » : pour démonter 12 boulons, il faut 11 minutes pour les 11 premiers et 1/2 heure pour le dernier, corrodé et peu accessible !

2. *Améliorer la disponibilité d'un équipement est un objectif habituel de la maintenance.* Il passe par l'amélioration de la maintenabilité, paramétrée par la *MTTR*.

Comment améliorer la MTTR ? Battre le « record » en travaillant vite n'est jamais la solution. Le gain sur la MTTR serait faible, et l'on ne peut pas battre des records du 1er janvier au 31 décembre. De plus, la réactivité attendue des interventions de maintenance ne doit pas se faire au détriment de la qualité.

L'expérience montre que c'est par la réduction des temps les plus longs que l'on va améliorer significativement la *MTTR*. En observant tous les aléas qui pénalisent les interventions et en les anticipant par une meilleure préparation, par un « lancement » efficace, par l'organisation rationnelle de la logistique de soutien (documents de travail, outillages adaptés et disponibles, rechanges disponibles, etc.).

Il suffit de suivre une intervention sur le terrain pour cibler des gisements d'amélioration : déplacements inutiles, attente de moyen de levage, outillage inadapté, accès scabreux et improvisés, nettoyages longs faute d'entretien régulier, schémas non à jour, rechanges absents du magasin, etc. Pour reprendre l'argument du « boulon rouillé », il est plus rentable d'éviter qu'il ne s'oxyde (graisser au montage, choisir de l'inox) que de vouloir gagner 1 seconde par boulon !

3. *Une bonne prévision des temps* n'est jamais faite pour être exacte, mais telle qu'elle soit mi-optimiste et mi-pessimiste. La *MTTR* obéit à ce critère probabiliste, et c'est elle qui doit être portée comme « temps alloué », et non le temps réaliste T_r, car la valeur modale est distincte de la moyenne pour toute distribution dissymétrique.

4. *La maintenabilité intrinsèque* est un critère déterminant, puisque le gain de performance inclus à l'origine vise la zone des aléas potentiels. Le gain *ab initio* est obtenu par l'accessibilité bien pensée, par l'alarme de localisation de défaut intégrée, par la modularité qui permet un échange standard rapide, etc.

Bilan : mieux vaut passer du temps à organiser une intervention, à anticiper les difficultés pour pouvoir travailler bien plutôt que de vouloir travailler vite ! Malgré l'impatience du client qui attend…

❑ Estimation des durées d'intervention

□ Méthode d'estimation d'une « durée prévue » à partir de la loi β

À l'hypothèse du paragraphe précédent, nous allons substituer l'hypothèse suivante : si l'on doit prévoir une durée d'intervention, elle appartient à la population distribuée selon le modèle décrit (figure 6.6). Pour une intervention préparée (contenu, moyens et ressources définis), la *MTTR* et l'écart-type sont estimés par les formules :

$$MTTR = \frac{T_o + 4T_r + T_p}{6} \text{ et } \sigma = \frac{T_p - T_o}{6}$$

Ces formules sont déduites de la loi β à deux paramètres p et q. Elles sont applicables sous certaines conditions généralement vérifiées pour les distributions du type étudié (BAT 77). Ces relations sont également utilisées pour l'estimation des durées de tâches et à l'évaluation du délai pour la méthode PERT (voir § 7.2).

Ces formules sont applicables « a priori » (estimation de T_o, T_r, T_p a priori) ou « a posteriori » par retour d'expérience de taille N. Si N données > 50, le préparateur estime le temps optimiste T_o tel que 10 % des temps lui soient inférieurs, le temps

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

pessimiste T_p tel que 10 % des temps lui soient supérieurs et le temps le plus fréquent T_r.

La *MTTR* ainsi facilement estimée est telle qu'il y a la même probabilité de ne pas l'atteindre que de la dépasser, ce qui caractérise une bonne prévision.

☐ Autres méthodes de prévision des durées d'intervention

- L'estimation « au jugé » est basée sur l'expérience du technicien. Celui-ci donnera spontanément le temps réaliste T_r et non le temps moyen *MTTR* cherché.
- Les méthodes déduites du MTM (*method time measurement*) sont basées sur la décomposition en mouvements élémentaires donnant des standards de temps prédéterminés. Certains standards « MTM degrés supérieurs » sont adaptés à quelques tâches répétitives de maintenance.
- Les standards de temps sont développés en interne par exploitation statistique des retours d'expérience. Ils permettent des interpolations et des corrections par facteurs d'environnement.
- La technique des « blocs de temps » utilise la vidéo pour connaître certains temps opératoires, mais elle est surtout utilisée pour analyser puis optimiser des successions d'opérations dans le cadre d'une réorganisation.
- Le chronométrage est mal vécu : à l'impression d'être jugé s'ajoute un changement d'allure, volontaire ou non, qui fausse le résultat.
- La méthode des observations instantanées (voir MON 90) permet d'estimer des temps d'états différents d'un processus continu à partir d'observations instantanées réalisées par campagne.

Exemple

L'exemple simple de la figure 6.7 illustre le principe de la méthode des observations instantanées à partir d'une succession de Marche/Arrêt dont on veut quantifier la proportion…

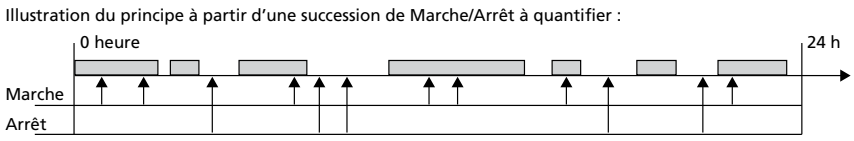


Figure 6.7 – Principe de la méthode des observations instantanées

Douze observations ont été faites à des instants pris « au hasard », donnant $p = 7$ Marche et $q = 5$ Arrêt, soit une estimation de l'engagement de $7/12 = 0{,}58$ soit 58 % pour l'état Marche. Sur 24 heures, l'équipement aura donc fonctionné 14 heures.

❑ Optimisation des durées d'intervention

Il est possible de moduler une durée d'intervention suivant des contraintes économiques ou d'ordonnancement (tâche du chemin critique, délai à raccourcir). Les leviers d'action sont les moyens humains (effectifs et motivation), matériels et logistiques à mettre en œuvre pour une tâche donnée. Réduire la durée implique

une augmentation des moyens, donc des coûts directs de cette intervention. Mais pas obligatoirement de son coût total.

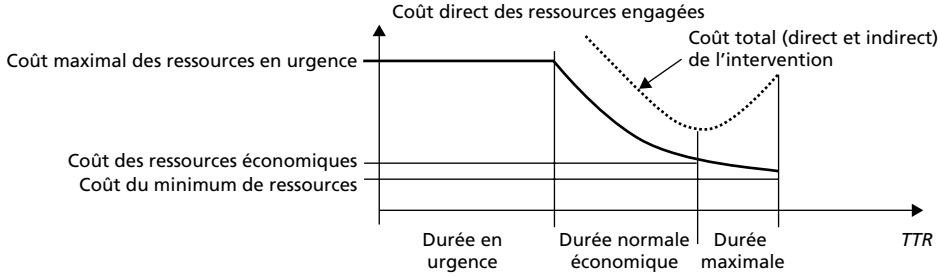


Figure 6.8 – Modulation des durées d'intervention en fonction des contraintes

Lorsqu'un agent des méthodes prépare une intervention, il lui affecte les moyens normaux économiques. C'est l'ordonnancement qui lui demandera une correction par augmentation des ressources de façon à tenir un délai.

6.2.3 Temps d'état des équipements : disponibilité/indisponibilité

❑ **Vocabulaire d'après CEN WI 319-003**

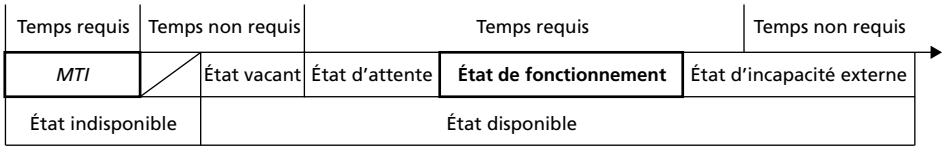


Figure 6.9 – Définition des différents états d'un équipement de production

– État d'indisponibilité : état d'un bien caractérisé soit par une panne, soit par une incapacité interne (maintenance préventive par exemple). La case *MTI* (moyenne des temps d'indisponibilité) correspond à l'état de génération de coûts d'indisponibilité propre C_i : *le système étant requis, il y a perte de production*.
– État vacant : état d'un bien qui est disponible et en état de non-fonctionnement pendant un temps non requis.
– État d'attente : état d'un bien qui est disponible et en état de non-fonctionnement pendant un temps requis.
– État d'incapacité externe : état d'un bien disponible, mais qui manque des ressources externes nécessaires.

À chaque état correspond un temps.

❑ **Vocabulaire d'après l'AFNOR X 60-020**

La figure 6.10 met en évidence une difficulté de la saisie des temps d'indisponibilité : un compteur relèvera l'alternance des *MTBF* et des *MTA*, ce qui est insuffisant pour discriminer les trois temps de non-production de natures différentes. Il est nécessaire d'ajouter un boîtier d'imputation des causes d'arrêt.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

En effet, la responsabilité de la maintenance n'est engagée que pour les temps propres d'indisponibilité, nommés *MTI*, le système étant requis. Ces temps d'indisponibilité propre serviront de base aux estimations des coûts de défaillance.

De plus, à l'intérieur de cette indisponibilité propre, il est nécessaire de dégager les temps actifs et les temps annexes de maintenance pour estimer la *MTTR* et pour identifier les anomalies.

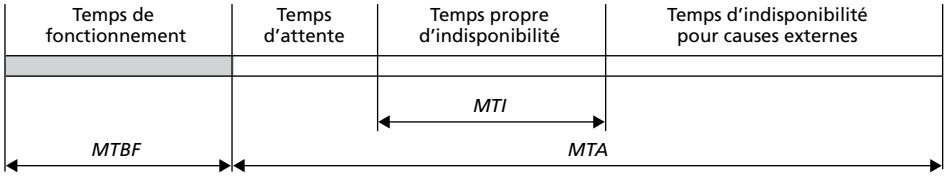


Figure 6.10 – Les temps d'indisponibilité

Remarque

Un cas intéressant relatif aux systèmes non requis concerne les systèmes de sécurité en *stand by* : sollicités, ils peuvent se révéler indisponibles, donc non opérationnels. Leur état est donc « masqué », ce qui représente un danger potentiel. L'analyse des modes de défaillances hors service se nomme *operational readiness*.

❑ **Conclusion**

La connaissance de tous ces temps d'état à partir de mesures objectives va permettre la tenue d'un tableau de bord de gestion technique de chaque équipement sensible. Par graphes d'évolution et par ratios comparatifs. Ce tableau de bord est un outil majeur d'analyse et de proposition d'améliorations, à la condition que tous les acteurs se mettent d'accord sur une règle du jeu (quel temps porter ?) consensuelle.

6.3 L'analyse des coûts de maintenance

6.3.1 Aspects économiques de la maintenance

Le chef d'entreprise confronté à ses échéances financières sait que les coûts directs de maintenance représentent un poste de dépenses important et bien visible. Le fait que la maintenance soit en même temps *un gisement de productivité* est un fait avéré, mais moins visible. En effet, les coûts indirects, conséquences d'une maintenance insuffisamment performante, « s'évaporent » de la comptabilité analytique, mais se retrouvent inexorablement dans les coûts de production.

La maintenance est donc un champ d'action privilégié de la recherche d'amélioration des coûts de production, et c'est la seule source significative de compétitivité *indépendante des conditions extérieures* : elle ne repose que sur le professionnalisme de l'entreprise relativement à la maîtrise de l'ensemble de son système de production.

Le maintien de la production en quantité et en qualité passe par l'efficacité de la maintenance de l'outil de production.

6.3.2 Problématique des coûts de maintenance

Le problème majeur est celui de la justification a priori d'une politique de maintenance préventive. Ce qui suppose au préalable de pouvoir apporter une réponse à la question : « Que coûte une défaillance d'équipement à l'entreprise ? », puisque l'objectif du préventif est de transformer une défaillance réelle en une défaillance virtuelle. La défaillance vécue représente une perte qui a une « réalité » économique. Mais il est illusoire de vouloir estimer exactement le coût des conséquences de cette défaillance. Illustrons notre propos par un exemple :

une panne → un retard de livraison → une perte de clients → une perte de combien ?

De façon analogue, combien coûte une marée noire ? un goéland mazouté ?

Le mieux à espérer est d'estimer objectivement certaines composantes de ce coût, ce qui amène à minorer la réalité. Au grand désespoir des « managers comptables du court terme », il est illusoire de vouloir quantifier au sens comptable les conséquences liées à un événement réalisé, et plus encore à un risque envisagé. Mais le fait qu'on ne soit pas capable de les calculer ne doit pas occulter le fait qu'ils sont *réels*.

Il y a là un *paradoxe qu'il vaut mieux mettre en évidence* qu'ignorer avant de rentrer dans les méthodes d'estimation.

De façon plus générale, la problématique des coûts de maintenance est donc celle de la justification du coût des conséquences d'une panne puis celle de la justification du coût des mesures préventives.

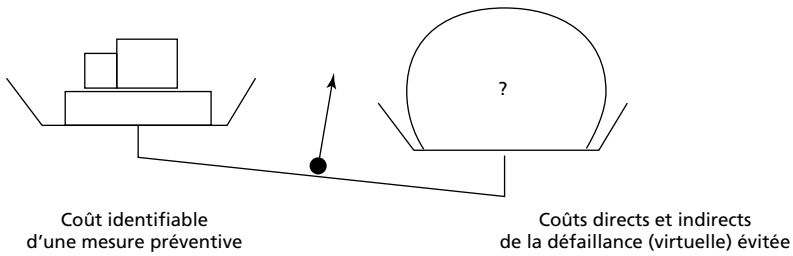


Figure 6.11

Synthèse du problème. Les coûts indirects d'une panne représentent :
– une *réalité économique* qui se retrouve dans le prix de revient final ;
– une impossibilité comptable de mesure : il s'agit d'une « *réalité floue* » ;
– une obligation gestionnaire d'estimation *a posteriori* (et *a priori*).

Remarque

Analogie avec le coût d'une action publicitaire :
- on sait ce qu'elle coûte (coûts directs),
- on ignorera toujours ce qu'elle rapporte au sens comptable,
- il est indispensable de mesurer son impact.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

6.3.3 Quelques bases de comptabilité

Quelques notions de comptabilité sont indispensables au chef de service maintenance responsable de son budget et du suivi des coûts, ainsi qu'à tout agent des méthodes, gestionnaire des équipements et des activités. Il faut savoir que toute entreprise française doit tenir une *comptabilité générale* obligatoire, et facultativement une *comptabilité analytique* précisée en classe 9 du plan comptable.

❑ Plan comptable français

Le plan comptable exige la tenue d'une comptabilité générale, dans laquelle tout mouvement financier crédite ou débite des comptes regroupés en classes codifiées.

□ Plans de comptes concernant la maintenance

Ce sont principalement les comptes de classe 3 dits « de stocks et d'en cours » et de classe 6 dits « de charge ».

Tableau 6.2 – Comptes de classe 6

Code	Intitulé
60	**Achats consommés**
601	Matières premières et fournitures
602	Autres approvisionnements
60222	Produits d'entretien
60223	Fournitures d'entretien et d'usines
604	Achats d'études et prestation de services
605	Achats de matériel, équipement et travaux
61	**Services extérieurs**
611	Sous-traitance générale
62	**Autres services extérieurs**
621	Personnes extérieures à l'entreprise
6211	Personnel intérimaire
6212	Personnel détaché ou prêt

□ Immobilisations

Par définition, ce sont des biens ou des valeurs destinés à rester durablement dans l'entreprise. Les équipements à maintenir sont des *immobilisations corporelles et amortissables.*

☐ Amortissements

L'amortissement est le constat comptable d'une perte de valeur d'un équipement résultant de l'usage, d'une obsolescence technique ou de toute autre cause dont les effets sont irréversibles. Pour être amortissable, une immobilisation doit être inscrite à l'actif du bilan et doit se déprécier dans le temps.

Le plan d'amortissement s'établit à partir de la durée de vie probable du bien, suivant un modèle linéaire ou un modèle dégressif, suivant la nature du bien.

Le taux d'amortissement est donné par *l'inverse de la durabilité prévisionnelle*. Pour 5 ans, il sera de 20 %, pour 10 ans, de 10 %, pour 15 ans, de 6,67 %. Dans le cas d'un amortissement linéaire, l'amortissement annuel est obtenu par :

valeur du bien × taux d'amortissement × temps au prorata des 12 mois.

Un bien d'une valeur de 80 000 € acheté en juillet et amortissable sur 5 ans sera amorti suivant le tableau 6.3.

Tableau 6.3 – Exemple d'amortissement linéaire

Année	Période	Valeur de l'amortissement	Valeur résiduelle
N	6 mois	80 000 × 0,2 × 6/12 = 8 000	72 000
N + 1	12 mois	80 000 × 0,2 × 12/12 = 16 000	56 000
N + 2	12 mois	80 000 × 0,2 × 12/12 = 16 000	40 000
…	…	…	…
N + 5	6 mois	80 000 × 0,2 × 6/12 = 8 000	0

☐ Charges incorporables ou non

Les charges présentes dans les deux comptabilités (générale et analytique) sont dites « incorporables ». Présentes seulement en comptabilité générale, elles sont dites « non incorporables ».

❑ Comptabilité analytique

La comptabilité analytique vise à mieux assurer le contrôle budgétaire par la connaissance des principaux coûts et marges afférents aux activités de l'entreprise. Sa définition implique un *dialogue* entre les services comptables et les services techniques, puisqu'elle doit s'adapter à la structure de l'entreprise, de ses moyens de production et d'exploitation. De la qualité de ce dialogue, par nature difficile (cultures professionnelles différentes), dépendent :

– la définition d'outils de suivi des coûts de maintenance simples et efficaces. Ils seront efficaces s'ils permettent un « *diagnostic* » : un coût a des causes et des conséquences… ;

– le perfectionnement « comptable et financier » du gestionnaire technique ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– la sensibilisation de tous les acteurs techniciens à l'aspect économique du geste technique. Ce dernier aspect est fondamental pour réaliser l'optimisation des méthodes correctives et préventives de la maintenance ;
– la découverte des aspects induits d'une réduction drastique des coûts dans le cadre d'une stratégie à court terme, tels le vieillissement accéléré et prématuré du parc matériel ou l'augmentation d'arrêts de production avec baisse de la quantité et de la qualité des produits, etc.

Une bonne comptabilité analytique doit pouvoir mettre en évidence la corrélation entre la réduction intempestive des dépenses de maintenance et la baisse des marges sur les produits vendus.

La mise en œuvre d'une GMAO permet souvent d'acquérir la maîtrise des coûts de maintenance, mais cette analyse par centre de coûts doit être compatible avec la comptabilité analytique de l'entreprise. Il serait préjudiciable que chaque service développe une comptabilité parallèle au hasard de sa propre GXAO !

6.3.4 Coûts de la maintenance corrective

Nous adopterons le modèle suivant :

$$C_d = C_m + C_i$$

C_d est le « coût de défaillance », résultant des coûts directs et indirects d'une ou d'un cumul de défaillances relatives à un équipement.

C_m est le « coût direct de maintenance » de caractérisation simplifiée « pièces et main-d'œuvre ».

C_i est le « coût d'indisponibilité » caractérisant le coût cumulé de toutes les conséquences indirectes induites par l'indisponibilité propre d'un équipement.

❑ Coûts directs de maintenance C_m

Ils peuvent se rapporter à une intervention corrective (C_{mc}), préventive (C_{mp}) ou externalisée (C_{me}). Dans ce dernier cas, la facture du prestataire de service permet la valorisation directe de l'intervention.

□ Coûts prévus et coûts réalisés

Comme les temps, les coûts ont le double aspect « prévision » puis « réalisation ».
– Les *coûts prévus* sont des estimations d'engagement de dépenses liées à une activité, des « devis » de la responsabilité des agents des méthodes. Ils n'ont pas de précision comptable, mais ils doivent cerner la réalité au plus juste.
– Les *coûts réalisés* sont obtenus par la valorisation des BT (bons de travail comportant les paramètres d'une intervention) sur papier ou sur écran GMAO. Leur cumul après imputation et ventilation permet de réaliser des analyses et des diagnostics, donc la gestion et la recherche d'amélioration.

□ Constitution des coûts directs de maintenance (C_{mc} et C_{mp})

Coût de la main-d'œuvre

C'est le produit « temps relevé × taux horaire » ou :

$$TTR \times \tau_1$$

– Le temps relevé doit coïncider avec le temps passé *TTR*. Il est saisi sur le bon de travail (BT) après vérification par le chef d'équipe.
– Le taux horaire τ_1, exprimé en euros/heure, est fourni par le service comptable. Il est évidemment fonction de la qualification professionnelle de l'intervenant, mais également de la politique sociale de l'entreprise. Ce qui explique sa dispersion importante, allant de 15 € à 45 €/h pour un même technicien employé dans des structures différentes. Il ne faut pas confondre le salaire horaire avec le taux horaire de main-d'œuvre !

Frais généraux du service maintenance

Ce sont les frais fixes du service, estimés à l'année et ramenés à l'heure d'activité. Ils sont parfois estimés en pourcentage du budget du service, ou intégrés au taux horaire. Ils comprennent les appointements des cadres, des employés de bureau, les loyers et assurances, les frais de chauffage, d'éclairage, de reprographie, de communication, etc.

Coûts de possession des stocks, des outillages, de machines

Aux frais de magasinage sont ajoutées les pertes et dépréciations dues au stockage. Selon les entreprises, ces coûts sont de 20 à 30 % par an de la valeur du stock.

Consommation de matières, produits et fournitures utilisées

L'exécution des tâches de maintenance exige de nombreuses fournitures, connues sur factures.

Consommation des pièces de rechange

C'est un poste important en maintenance, évalué à partir des factures d'achat qu'il faut actualiser (pièce dormante pendant plusieurs années, mais stratégique) et corriger par la prise en compte des frais de transport, du coût de passation de commande, des frais de magasinage et de l'éventuelle dépréciation.

Coût des contrats de maintenance

La maintenance de certains matériels spécifiques est parfois externalisée : le montant du contrat est négocié, généralement à l'année.

Coûts des travaux sous-traités

Ils sont connus par la facture du prestataire, puis éventuellement majorés par un taux de « participation du service » sous forme de prêt de matériel, renseignements et assistance, contrôle, etc.

□ Total des coûts directs de maintenance

Il est possible de regrouper les coûts de maintenance sous quatre rubriques :
– C_{mo} dépenses de main-d'œuvre,
– C_f dépenses fixes du service maintenance,
– C_c dépenses de consommables,
– C_e dépenses externalisées.

$$C_{mo} + C_f + C_c + C_e = C_m$$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Le coût de maintenance C_m peut se rapporter aussi bien au chiffrage d'une intervention isolée qu'au cumul des coûts de N interventions sur une période donnée (bilan annuel le plus souvent).

☐ Exploitation

Lorsque le coût direct de maintenance est imputé à une somme d'interventions, le cumul des C_m permet une ventilation afférente à un équipement, à un type de matériel, à un secteur ou à un type d'activité (correctif par niveau, préventif, révisions, modernisation, rénovation…). L'utilisation d'une GMAO facilite considérablement ces mises en familles adaptées à des analyses économiques pertinentes.

> **Remarque**
>
> La figure 6.8 du paragraphe 6.2.2 met en évidence l'existence d'un optimum économique de C_m en fonction de la durée de l'intervention, donc des moyens mis en œuvre. Nous avons donc un levier d'action pour moduler le coût direct d'une intervention, sans négliger les risques de la non-qualité induite par une intervention trop rapide.

❑ Coûts indirects d'indisponibilité C_i

Ces coûts indirects d'indisponibilité intègrent toutes les conséquences économiques induites par un arrêt propre d'un équipement requis. Ils sont parfois nommés coûts de perte de production ou coûts de non-maintenance.

> **Remarque préalable**
>
> Il est évident que certaines conséquences d'une défaillance sont difficilement quantifiables ou ne le sont pas du tout : la dégradation de l'image de marque due à un non-respect des délais de livraison venant d'un arrêt fortuit sur panne durable coûte combien ? *Le fait que l'on ne sache pas les quantifier ne doit pas masquer le fait qu'ils sont réels !* Nous considérerons donc que les C_i estimés avec le maximum d'éléments objectifs ne sont que des minorants des C_i réels.

☐ Constitution des coûts d'indisponibilité C_i

Les conséquences d'une défaillance fortuite sur un équipement requis peuvent porter sur les éléments suivants.

– La perte de production C_p. Il est bien évident que, pendant un arrêt en fin de ligne de production (montage, par exemple), les produits non fabriqués ne sont donc pas non vendus, mais sont vendus par la concurrence… C'est le poste principal qu'il est possible d'estimer par la formule :

$$C_p = \tau_2 \times T_i$$

T_i est le temps de l'indisponibilité propre relevé pendant une période où l'équipement défaillant est requis. À défaut, le temps d'arrêt de production T_A peut être utilisé. Mais dans ce cas existent des coûts de perte de production pendant T_A non imputables à l'équipement (temps d'attente et temps d'indisponibilité pour causes externes).

τ_2 est le taux horaire, exprimé en euros/heure, déterminé pour l'équipement considéré. Il dépend majoritairement de la criticité de l'équipement à l'intérieur de l'ensemble du système de production. Des péréquations permettent de

répartir les pertes globales estimées sur l'année en les ramenant à l'heure d'activité de production et à chaque équipement sensible affecté d'un coefficient de criticité. Ce taux par équipement doit être fourni à l'agent des méthodes chargé de l'optimisation de la politique de maintenance. Lorsque le taux τ_2 intègre tous les critères de perte suivants, la formule devient :

$$C_i = \tau'_2 \times T_i$$

en sachant que C_i est toujours minoré.

- Le coût de la main-d'œuvre de production inoccupée pendant T_i.
- Le coût d'amortissement (non réalisé) du matériel arrêté, le coût du matériel excédentaire.
- Le coût des arrêts induits. Particulièrement en flux tendu sur une ligne de production, faute de stocks tampons, l'arrêt d'une unité perturbe rapidement les unités amont (saturation) et aval (pénurie). Les systèmes actuels et leur organisation sont à la fois très performants et très vulnérables à la panne.
- Le coût des rebuts et de la non-qualité.
- Les frais de redémarrage de la production. Souvent, le redémarrage d'un process (hors T_i) induit une période de perte de matière ou de qualité qui oblige à éliminer les produits fabriqués.
- Les coûts induits en cas d'accident corporel. Une panne fortuite traitée dans l'urgence est malheureusement parfois génératrice d'accidents du travail en interne ou de dommage corporel au niveau des usagers.
- Les coûts induits par les délais non tenus. Pénalités de retard, perte de client ou dégradation de l'image de marque de l'entreprise.

□ Quelques réflexions à partir des coûts d'indisponibilité

- L'impact économique de chacun de ces coûts induits par l'indisponibilité d'un équipement stratégique est naturellement difficile à chiffrer. Mais s'ils sont très variables, ils n'en sont pas moins réels. Remarquons qu'ils étaient dans le passé parfois nuls ou négligeables : la panne d'une machine à coudre dans un atelier qui en contient 100 n'a d'autre conséquence que le coût direct C_m de sa remise à niveau.
- Le fait que l'évolution technologique et organisationnelle de la production ait rendu les coûts d'indisponibilité forts ou rédhibitoires est l'un des moteurs qui a fait émerger le besoin de maintenance et qui justifie son importance. Remarquons que si les C_m intègrent le budget du service maintenance, ce n'est pas le cas des C_i. Ceux-ci ne s'évaporent pas pour autant : leur réalité se retrouvera inexorablement en final pour réduire les marges de l'entreprise…
- La problématique de la maintenance se situe à ce niveau : *combien coûte à l'entreprise cet arrêt sur panne ?* La réponse est possible pour C_m, difficile pour C_i. Combien aurait coûté à l'entreprise cet arrêt que la maintenance a su prévenir, donc qui n'a pas eu lieu ? Il faut bien admettre que la justification économique du préventif ne peut se faire que par défaut, ce qui ne satisfait pas toujours le gestionnaire penché sur ses colonnes « recettes-dépenses » !

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Coûts de défaillance C_d

Rappelons que le coût d'une défaillance ou le coût d'un cumul de défaillances relatives à un équipement est donné par :

$$C_d = C_m + C_i$$

L'estimation du coût de défaillance et son suivi périodique n'ont d'intérêt que pour quelques équipements clés dont les répercussions des indisponibilités sont économiquement sensibles.

□ Évolution des C_d et du besoin de maintenance

Nous allons envisager l'évolution du ratio $r = C_i/C_m$ dont la croissance de 0 à 1, 10, 100 traduit le besoin de maîtriser le comportement des systèmes par la maintenance et, au-delà, d'utiliser les techniques de la sûreté de fonctionnement pour assurer une bonne disponibilité à l'origine.

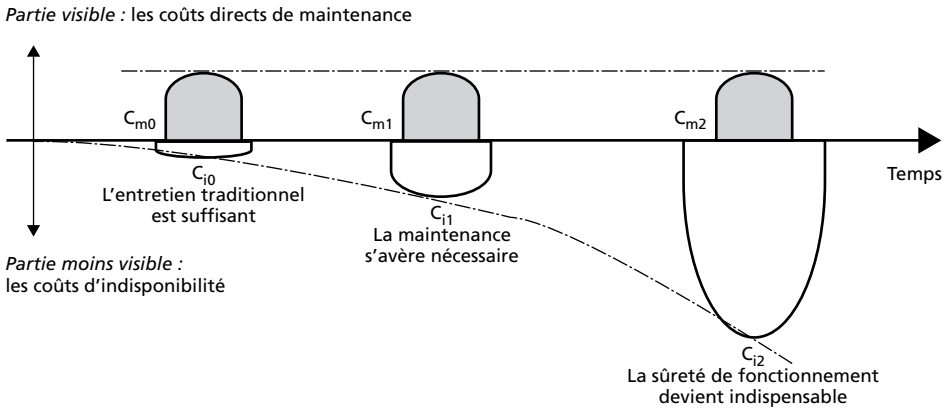


Figure 6.12 – Évolution des coûts d'indisponibilité

L'image traditionnelle de « l'iceberg des coûts » de la figure 6.12 montre que les coûts directs C_m liés aux défaillances sont d'une part bien « visibles », d'autre part sensiblement constants.

Par contre, les coûts C_i des conséquences des défaillances subissent une forte croissance sur les équipements sensibles utilisés « en série » et gérés en flux tendus. Ils ne se révèlent qu'a posteriori, et seulement de façon partielle, tout au moins sur le plan comptable.

Remarque

Dans un même atelier, deux machines voisines peuvent engendrer l'une des $C_i = 0$, l'autre des C_i critiques. La sélection des équipements en fonction de leurs *coûts d'indisponibilité estimés* est donc un prérequis au choix de la politique préventive à leur appliquer.

☐ **Optimisation des coûts de défaillance C_d**

C_m et C_i varient en sens inverse, dans la mesure où la réduction des temps d'indisponibilité est le résultat d'une maintenance préventive plus efficace.

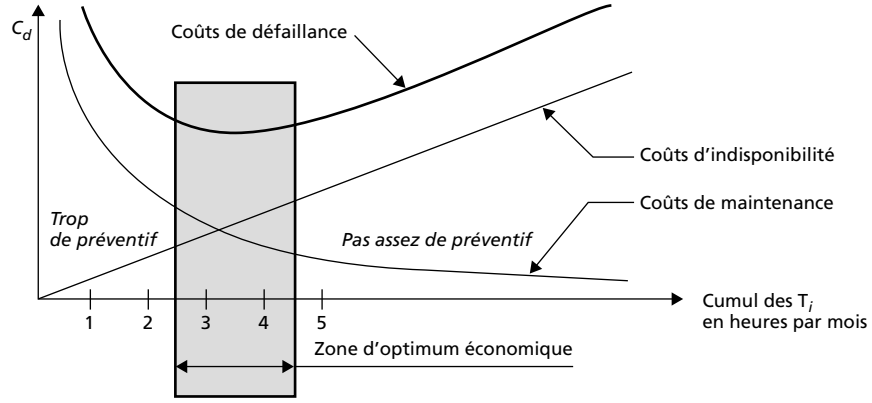


Figure 6.13 – Quel soin préventif apporter à un équipement ?

La figure 6.13 met en évidence la proportionnalité $C_i = \tau \times T_i$, les T_i étant relevés en heures d'indisponibilité par semaine ou par mois. Les coûts directs de maintenance sont dans ce cas surtout préventifs, le graphe montrant l'existence d'une « limite » de disponibilité intrinsèque qui demande trop de coûts directs pour être approchée. Dans notre exemple, vouloir avoir moins de 2,5 heures d'indisponibilité par mois exigerait trop de soins préventifs.

6.3.5 Coûts de maintenance préventive

Les coûts de maintenance préventive (C_{mp}) varient logiquement à l'inverse des coûts directs de maintenance corrective (C_{mc}). En fait, la stratégie de maintenance permet de choisir librement le niveau de soin préventif à organiser sur un équipement. Dans ce cas, les coûts correctifs deviennent des coûts résiduels.

❑ **Cas de la maintenance systématique**

Le coût total annuel de la maintenance d'un équipement peut se simuler sous la forme :

Coût total = Coût du préventif systématique + Coût des défaillances résiduelles

$$C_{total} = \frac{t}{T} C_{mp} + C_d \lambda t$$

t est la période de référence (1 an, par exemple) exprimée en heures.

T est la période d'intervention systématique.

t/T est le nombre d'I_{ps} pendant la période de référence.

λ est le taux de défaillances résiduelles, en panne/heure.

C_{mp} est le coût d'une I_{ps}.

$C_d = C_{mc} + C_i$ est le coût d'une défaillance résiduelle.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

En règle générale, il appartient aux agents des méthodes de programmer les interventions préventives sans perturber la production. Les interventions seront donc réalisées en dehors du « temps requis », soit en profitant d'un arrêt programmé (voire fortuit) de production ou d'une révision, soit en utilisant des plages d'intervention en dehors de l'horaire de production (exemple des équipes VSD, vendredi, samedi, dimanche).

Sauf exception, les coûts de maintenance préventive systématique ne seront donc associés à aucun C_i. Ils sont constitués de la même façon que les coûts de maintenance corrective « pièces et main-d'œuvre ».

❑ **Cas de la maintenance conditionnelle**

Dans le cas de la maintenance conditionnelle, remarquons :

– que le temps de réaction après alarme ne permet pas forcément de prendre des dispositions pour ne pas subir de temps d'indisponibilité en temps requis, donc les C_i correspondants. Dans ce cas existera un « coût résiduel de défaillance prévenue » bien inférieur cependant au coût de la défaillance non prévenue ;

– que la mise en œuvre initiale passe par un « investissement » sous forme de chaînes d'acquisition de données ou d'appareils de mesure ou de monitorage parfois coûteux.

6.3.6 Les pertes économiques en maintenance productive totale

Dans une logique de TPM, le taux de rendement synthétique *TRS* d'un équipement intègre les différents événements susceptibles d'être « causes » de pertes économiques, donc de devenir des gisements potentiels d'économie. Cela de façon décloisonnée entre les services production, maintenance et qualité. De la même manière que pour l'estimation des coûts d'indisponibilité propres, les pertes économiques liées aux différents dysfonctionnements d'un équipement ne peuvent être estimées que de façon approximative et minorée.

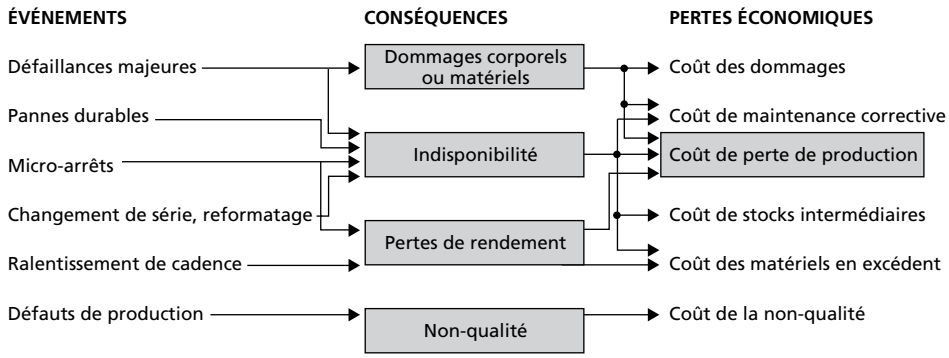


Figure 6.14 – Les pertes de productivité liées aux équipements

Le coût de perte de production utilisé ici est différent du précédent C_i, coût d'indisponibilité qui se référait à « l'indisponibilité propre » du domaine de responsabilité stricte de la maintenance. Dans une logique TPM, le système est indisponible quelle

que soit la cause de l'indisponibilité, intrinsèque ou externe. Par contre, tous les coûts induits par l'indisponibilité d'un équipement sont de même nature. En particulier, la dégradation de l'image de marque ainsi que la perte potentielle de marchés sont des conséquences communes aux six événements identifiés.

Remarque

Le coût du cycle de vie (*LCC* ou *life cycle cost*) d'un équipement ainsi que son « coût moyen annuel » sont analysés au paragraphe 9.4 intitulé « Maîtriser le cycle de vie d'un équipement ».

6.4 La préparation des actions de maintenance corrective

6.4.1 Préparer la maintenance : est-ce rentable ?

❑ **Introduction**

La préparation du travail est une des missions du bureau des méthodes de maintenance. Elle a pour vocation première d'être « *une aide à la réalisation* » dans le but de réduire les durées d'intervention des techniciens et les durées d'immobilisation des équipements. Donc d'améliorer leur disponibilité, donc la productivité de l'entreprise. La réduction des *MTTR* s'obtiendra par une anticipation de tous les temps improductifs et de tous les aléas susceptibles de faire durer une intervention, ainsi que nous l'avons montré sur la figure 6.6 du paragraphe 6.2.2.

☐ **Quelques réflexions préalables**

Aucun travail important ne saurait être mené à bien s'il n'est pas préparé en amont de l'exécution. Toute tâche technique est inévitablement préparée. Parfois seulement par la réflexion de l'intervenant. Ainsi, planter un clou dans un mur implique une réflexion préliminaire de préparation. Le problème n'est donc pas de savoir si l'on doit préparer ou non, mais de trouver le « *niveau de formalisation* » le mieux adapté à la nature de la tâche à exécuter.

En maintenance, la réalisation des travaux se fait en dehors des conditions normales de fonctionnement des équipements, donc a priori « hors sécurité ». Le premier réflexe à avoir avant l'exécution d'une tâche est de *définir les conditions de sécurité* des intervenants. Même et surtout en situation d'urgence.

☐ **Quelques spécificités des tâches de maintenance corrective**

– Elles sont d'ampleurs très variables : du petit dépannage en quelques minutes à des réparations lourdes requérant des équipes complètes.
– Elles peuvent être urgentes, ou dangereuses, ou techniquement délicates, ou tout à la fois !
– Elles sont effectuées par des techniciens spécialistes connaissant bien les matériels.
– Elles sont effectuées par des techniciens parfois soumis à la pression des coûts d'indisponibilité.
– Elles sont parfois répétitives et parfois inédites.
– Elles sont par nature fortuites, ce qui ne signifie pas qu'elles sont inattendues ni préparées.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

L'agent des méthodes doit avoir tous ces éléments à l'esprit pour adapter le contenu et le dimensionnement de sa préparation au contexte. Le dernier point est spécialement important : nul ne peut « prédire » la date d'une panne catalectique, mais il est toujours possible de « prévoir » sa nature et sa probabilité (AMDEC par exemple) et de la préparer. À l'image de votre constructeur d'automobile, qui vous a livré votre auto avec une roue de secours, un cric et le mode opératoire : mais ne lui demandez pas la date de votre prochaine crevaison !

❑ Définition de la préparation

La préparation est une tâche d'anticipation des difficultés rencontrées sur le terrain, effectuée par un technicien qui connaît le terrain : l'agent des méthodes (voir § 6.1.2). Elle consiste à prévoir les paramètres d'exécution d'une tâche, à identifier les problèmes potentiels, à définir les besoins puis à rédiger les documents de préparation.

La préparation d'une tâche corrective peut se faire avant la défaillance (cas d'une défaillance attendue avec préparation anticipée) ou après la défaillance (cas d'une défaillance non prévue avec préparation « à chaud »).

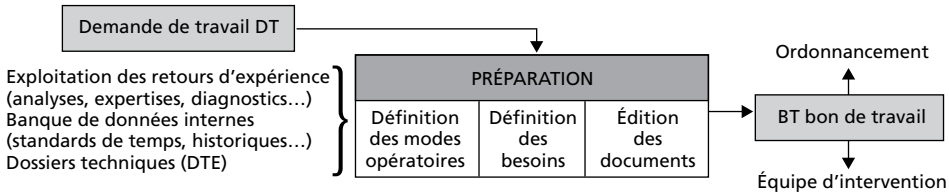


Figure 6.15 – Situation et rôle de la préparation du travail de maintenance corrective

Suite à la défaillance détectée et à l'émission d'une DT, s'il ne s'agit pas d'un simple dépannage, le rôle du préparateur est d'aller sur le site. Seule l'observation *in situ* des faits techniques lui permettra de réaliser une « expertise » préalable à la définition des mesures de sécurité et des opérations de remise à niveau.

❑ Rentabilité de la préparation

Le problème de la rentabilité de la préparation est de même nature que celui de la maintenance préventive : ce qu'elle coûte est bien visible, ce qu'elle économise ne l'est pas, car une intervention bien préparée et exécutée « sans problème » paraît naturelle. Analysons les gisements de gaspillage de temps que cette préparation a évité :

– temps de recherche de DTE, de schémas, de plans, d'historiques, etc. ;
– temps de recherche et de choix d'outillage, voire de leur confection ou de leur adaptation ;
– temps de recherche de matières et de produits ;
– temps d'attente au magasin pour la pièce de rechange parfois manquante : alors, temps de la course avec un véhicule de service pour la chercher chez un distributeur industriel, voisin ou non ;

– temps de parcours entre le site, les magasins, les bureaux, etc. ;
– temps d'attente d'instructions ;
– temps d'hésitation sur le mode opératoire, temps de démontages s'avérant inutiles.

Cette liste des gaspillages de temps (donc de coûts) n'est malheureusement pas exhaustive et l'observation *in situ* d'interventions non préparées est édifiante sur le rapport temps de travail productif/temps non productif.

☐ **Recherche d'un niveau optimal de formalisation d'une préparation**

La courbe théorique 6.16 montre l'existence d'un optimum, mais est surtout instructive pour éviter les deux écueils que sont la sous-préparation et la sur-préparation.

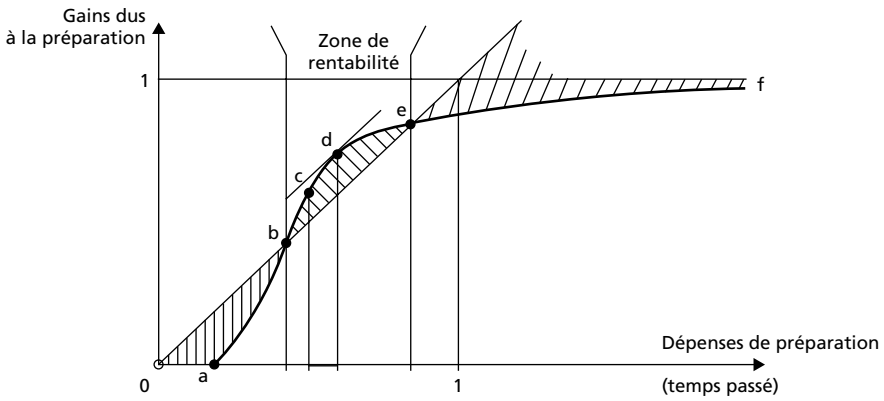


Figure 6.16 – Une préparation doit être rentable

0, a, ab : préparation trop superficielle pour être utile.

c, d : préparation optimale bien adaptée au travail à réaliser.

e, f : préparation trop détaillée, donc trop partiellement exploitée, s'adressant à des techniciens compétents.

Notons qu'outre son caractère opérationnel une préparation peut avoir une justification « juridique » dégageant la responsabilité du préparateur en cas de procédure non suivie. A contrario, elle peut engager la responsabilité du préparateur en cas de procédure erronée ou insuffisante (accident du travail, dommages important aux installations).

☐ **La préparation se justifie par un « contrat de résultat »**

Les résultats attendus d'une préparation efficace sont :
– la qualité du travail, avec en corollaire la confiance du « client producteur » ;
– le temps d'indisponibilité *MTI* et la durée d'intervention *MTTR* réduits par l'anticipation des aléas, avec en corollaire moins de stress chez les techniciens et une réduction des coûts directs (*MTTR*) et indirects (*MTI*) ;
– la sécurité des biens et des personnes assurée ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

et exceptionnellement, suivant la nature de certains travaux spécifiques :

– la rapidité (intervention en milieu agressif, par exemple) ou la précision (cas d'une opération délicate).

6.4.2 Contenus d'une préparation

❑ **Prise en compte de la sécurité**

Les situations de maintenance entraînent souvent la perte de la sécurité intégrée au matériel par le constructeur, prévue souvent pour la marche normale et non pour les modes dégradés. Cela reste vrai bien que les directives européennes et la loi 91-1414 du 31 décembre 1991 stipulent que les équipements « doivent être conçus et construits de façon que leur mise en place, leur utilisation, leur réglage, *leur maintenance* n'exposent pas les personnes à un risque d'atteinte à leur sécurité et à leur santé ». Se référer à la brochure INRS 94 relative à la maîtrise du risque en maintenance.

□ **Rôle du préparateur**

La responsabilité du préparateur peut être engagée en cas d'accident survenant lors d'une intervention de sa compétence. Son premier réflexe doit donc être de « penser sécurité » par estimation du risque face à une situation dangereuse, quelle que soit l'urgence. Son rôle est de « concevoir » la sécurité particulière de chaque « phase » d'intervention en accord avec :

– les textes et règlements généraux relatifs à la sécurité ;

– les règlements concernant les technologies, les matériels spécifiques du site et leur environnement ;

– la liste des habilitations.

□ **Méthodologie d'identification des risques, à mettre en œuvre à partir de l'observation sur le terrain**

1. *Zone* : définir la zone concernée, les modalités d'accès à la zone et à l'équipement identifié « défaillant ». Créer un périmètre balisé interdit ou réglementé et les procédures de condamnations éventuelles.
2. *Ambiance* : caractériser « l'ambiance » de la zone : atmosphérique, lumineuse, sonore, thermique, de rayonnement, etc.
3. *Énergie* : identifier les énergies présentes sur zone, qu'elles soient actives ou inactives : électrique, mécanique, chimique, hydraulique, etc. et les risques liés à ces énergies.
4. *Informations* : définir les flux d'information entrants ou sortants de la zone (cas d'une commande centralisée) de façon à prévenir des interactions avec les opérations de maintenance.
5. *Intervention* : pour chaque phase d'une intervention, identifier les risques liés aux *conditions du travail* (en hauteur, en zone exiguë, à l'extérieur, etc.), à la *mise en œuvre de l'opération* (avec points chauds, avec produits corrosifs, levage et manutention, dégagements gazeux, etc.), aux *intervenants* (succession d'équipes, stress).

6. *Interférence :* lors de la planification, veiller à ce que la proximité de travailleurs exécutant des missions différentes et dangereuses l'une pour l'autre soit prise en compte ; ex : des travaux de peinture à quelques mètres d'une opération de soudage.

☐ **Définition des mesures de sécurité à partir des risques identifiés**

Ces mesures doivent figurer sur les préparations remises aux équipes. Dans le cas d'interventions externalisées, le gestionnaire doit faire signer au prestataire de service les règles permanentes de sécurité de l'entreprise et les consignes spécifiquement préparées pour l'intervention contractée.

❑ **Définition des modes opératoires : la gamme d'intervention**

☐ **Décomposition d'une gamme d'intervention : notion de phase**

Suivant l'ampleur du travail, il sera défini par une « gamme » décomposée en phases, sous-phases et opérations, chacune étant repérée.

Les GMAO permettent de gagner du temps en utilisant des gammes pré établies ou en réutilisant des gammes déjà utilisées.

Définition de la phase

La phase de travail est l'ensemble des opérations qu'il est logique de grouper afin de les confier à une même équipe d'intervention, dont le début et la fin sont bien définis et dont le contenu est contrôlable.

Avantages du découpage en phase

– Estimer le « temps prévu » et identifier les moyens nécessaires pour chaque phase.
– Suivre facilement l'avancement d'un travail en veillant à l'enclenchement des phases.
– Composer une équipe dont la taille et les qualifications sont adaptées à la réalisation souhaitée.
– Ne fournir à l'équipe que les instructions précises et les documents spécifiques de la phase.
– « Faire ou faire faire » : il sera facile de sous-traiter une phase à une entreprise extérieure.
– Assurer facilement le contrôle.
– Valoriser C_m, coût direct de maintenance de la phase.

Remarque relative à l'enclenchement des phases

Suivant l'ampleur du travail, le préparateur réalisera un dossier d'ordres de travail ou un ordre de travail isolé correspondant à une seule phase. Sur le dossier, un schéma d'enclenchement des phases établi suivant le modèle « série, parallèle » sera fourni à l'ordonnancement et aux équipes.

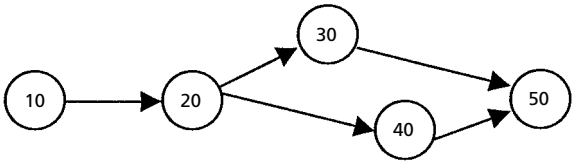


Figure 6.17 – Schéma d'enclenchement des phases

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Les phases 30 et 40 sont prévues « en parallèle », la durée la plus longue des deux étant seule prise en compte pour la détermination du délai (notion de chemin critique). Un exemple de dossier d'OT et de son schéma d'enclenchement sera donné au paragraphe 7.1.

☐ **Phases extrêmes**

– Prendre l'habitude de commencer la gamme par une phase systématique 10 « mesures de sécurité ».
– Terminer la gamme par les deux phases systématiques « contrôle » et « essais ».

☐ **Gamme-type**

Lorsqu'une intervention est répétitive, il est possible d'économiser du temps de préparation en réalisant une gamme-type. Prenons l'exemple d'une papeterie possédant un millier de pompes centrifuges de marques et de performances différentes : il est toujours possible de rédiger une gamme commune pour les opérations principales (rouet, ligne d'arbre, étanchéité) quitte à individualiser ensuite les préconisations sur le BT. La gamme-type peut être utilisée en correctif ou en préventif (gamme de révision périodique).

❑ **Définition des besoins**

Une préparation ayant comme vocation d'être une « aide aux intervenants », il est logique qu'elle recense leurs besoins et qu'elle définisse les moyens nécessaires à l'intervention. À chaque BT seront donc associés les besoins en personnel et les besoins en moyens : informations, outillages, matières, produits et pièces.

La GMAO permet de vérifier la présence en magasin des matériels et pièces de rechange et de les réserver.

> **Remarque**
>
> Il appartiendra à la sous-fonction « lancement » de regrouper ces moyens en assurant leur disponibilité à l'heure H, jour J, ce qui est fondamental pour réduire les gaspillages des temps non productifs (voir § 7.1 et figure 6.6).

☐ **Besoins en personnel**

À partir de la nature des travaux envisagés, il est nécessaire que le préparateur compose une « équipe » à partir de la liste des qualifications et des habilitations présentes. C'est à ce niveau que le choix d'une externalisation est nécessaire, faute de compétences en interne sur le champ requis par la tâche. Notons que le temps prévu et la dimension de l'équipe sont deux facteurs liés (voir figure 6.8).

☐ **Besoins en moyens matériels**

Énumérons les besoins caractéristiques de la logistique de maintenance.

– La *documentation*, sous forme de DTE (plans, schémas, etc.), d'historique de l'équipement concerné, et spécialement la dernière intervention réalisée, et bien sûr la préparation et son BT.
– La *liste des outillages spécifiques :* testeurs, appareils de contrôle, outils hors standard, etc.
– La *liste des moyens spécifiques :* échafaudage, levage, manutention, etc.

– La *liste des matières et des produits :* graisse, solvant, pâte à joint, etc.
– La *liste des fournitures et des pièces de rechange :* de la quincaillerie (vis, roulements, composants, etc.) à la pièce et au module de rechange (carte électronique, distributeur, moteur électrique, etc.).

Afin de réduire les durées MTTR, il est souhaitable que le BT soit accompagné des BSM (bons de sortie magasin) portant la désignation, la codification et les références, le nombre et l'imputation comptable à l'OT ouvert. Cette organisation permet au magasinier de préparer la commande (si nécessaire, émission de DA, demande d'approvisionnement) dans l'attente du « lancement ».

Dans les entreprises et les GMAO, l'OT sera parfois appelé BT et le BT appelé opération ou tâche. De même le BSM sera parfois nommé liste à servir ou réservation, bon de sortie mais l'esprit est le même.

❑ Édition des documents opérationnels

Le préparateur aura à finaliser son analyse du travail par la rédaction et l'émission des documents afférents à l'intervention et destinés à l'ordonnancement ou directement au chef d'équipe suivant l'importance et l'urgence de la tâche.

□ Choix du support

Les documents peuvent être tout papier, ou tout informatique avec l'aide d'une GMAO performante, ou mixte. Il n'y a pas de bon modèle standard de BT : le bon modèle est celui adapté au contexte du service et établi en concertation avec les techniciens chargés de les utiliser. C'est un bon moyen si l'on veut qu'il soit exploitable en retour d'expérience.

□ Nature des documents

La base de l'organisation traditionnelle, informatisée ou non, repose sur le tryptique DT, BT, OT.

– DT : demande de travail n° xxxx correspondant à l'ouverture d'un compte d'imputation.
– OT : ordre de travail n° xxxx, destiné à l'ordonnancement.
– BT : bon de travail destiné aux méthodes, qui est un résumé de la préparation. Le BT peut servir de document d'enregistrement du travail effectué, visé par le chef d'équipe.

Dans le cas d'un travail important sera établi un dossier de BT découpé en phases. Chaque phase aura un bon de travail associé à un n° de BT. Le mode opératoire simplifié sera rédigé sur le BT, portant le temps alloué et accompagné si nécessaire :

– des procédures de sécurité ;
– d'une gamme détaillée comportant le détail des opérations et les moyens matériels requis ;
– de la documentation utile (DTE complet ou tirés à part) ;
– des BSM destinés au magasin ;
– du bon de consignation éventuel de l'équipement, destiné à la production.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ **Cas de la préparation du travail externalisé**

La préparation est dans ce cas plus lourde, puisqu'elle doit préciser en plus des clauses techniques :

– les mesures de sécurité, générales pour l'entreprise et particulières pour le travail demandé ;
– les modalités d'accès au site ;
– la nature de l'aide logistique apportée en interne ;
– les compétences du personnel du prestataire et leurs conditions de travail ;
– les modalités du contrôle du travail réputé achevé (voir le § 8.4, dédié à l'externalisation de la maintenance).

Il appartient au préparateur de rédiger l'appel d'offre, puis le contrat avec les clauses économiques et, en l'absence de spécialiste du droit, les précautions juridiques : quand nous attirions l'attention sur la nécessaire polyvalence d'un agent des méthodes !

❑ **Conclusion : qu'est-ce qu'une bonne préparation ?**

C'est une préparation « minimale » en temps passé et en volume rédigé qui aura servi sur le terrain :

– à assurer la sécurité des intervenants ;
– à les guider sans ambiguïté lors des opérations successives ;
– à anticiper leurs difficultés, réduisant la part d'improvisation ;
– à éviter la majorité des temps improductifs (attentes, déplacements inutiles, démontages sans intérêt).

Pour arriver à ce résultat de rentabilité de la préparation, un *climat de confiance réciproque* est indispensable dans le dialogue entre les techniciens et le préparateur, homme de terrain, rappelons-le.

6.5 La préparation des actions de maintenance préventive

6.5.1 Rappel sur la nature des opérations préventives

Ce chapitre complète les éléments exposés dans les paragraphes 2.1, 2.2, 2.3 (les maintenances préventives) et 3.4 (plan de maintenance) à partir desquels nous allons identifier le rôle spécifique du préparateur. Reprenons la définition AFNOR X 60-100 de la maintenance préventive : « Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance et de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique) ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle). »

❑ Cas de la maintenance systématique

Toutes les interventions préventives systématiques I_{ps} ont en commun d'être déterminées par une période constante T caractérisant un échéancier. La préparation consiste à établir ces échéanciers par application de la méthode ABAC-ABAD, puis à définir les gammes d'opération pour chaque nature d'activité.

Tableau 6.4 – Nature des interventions I_{ps} à préparer

Nature	Niveaux	Périodicité
Les consignes permanentes de poste	1	1 jour à 1 semaine
Les rondes de surveillance sur certains secteurs du site	1	
Les opérations d'automaintenance, dans le cas de la TPM	1	
Les opérations de lubrification	1,2	
Les visites préventives sur les équipements	2	
Les remplacements préventifs de composants et de modules	1,2,3	
Les contrôles périodiques obligatoires		
Les révisions périodiques d'équipement, partielles ou générales	3,4	
Les arrêts périodiques d'unités de production (secteurs)	4	1 an ou plus

❑ Cas de la maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle pose un problème différent, puisque la préparer revient à la mettre en œuvre, suivant la méthodologie proposée au paragraphe 2.3.2. La surveillance des paramètres significatifs et des seuils peut se faire de deux manières :

– par surveillance centralisée, la collecte des informations d'états étant automatique ;
– par surveillance *in situ*, la collecte des informations se faisant par rondes systématiques. Dans ce cas, la préparation des rondes (fréquence, « route », définition des relevés, procédure d'alarme face à un seuil atteint) s'apparente à la maintenance systématique.

Les interventions préventives conditionnelles I_{pc} peuvent se préparer par analogie avec les interventions correctives I_c prévues. L'alarme génère un OTP (ordre de travail préventif) dont le contenu est prédéfini par le préparateur sur une gamme d'intervention.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

6.5.2 Préparation de la maintenance préventive systématique

❑ **Rôle du préparateur**

Dans le cas de la maintenance systématique, le rôle de l'agent des méthodes est double : il a la charge d'analyser les données relatives à une tâche pour en déduire les modalités de sa préparation (figure 6.18).

Le rôle « préparateur » de l'agent des méthodes est indissociable de son rôle « analyste », le systématique devant être vivant, c'est-à-dire progressivement optimisé économiquement en fonction des effets mesurés du préventif et de l'environnement économique de l'entreprise. Techniquement existe la liberté de faire un peu ou beaucoup, pas assez ou trop de préventif systématique : c'est pourquoi la détermination d'objectifs associés à un budget est indispensable, et que ces objectifs doivent être périodiquement révisés.

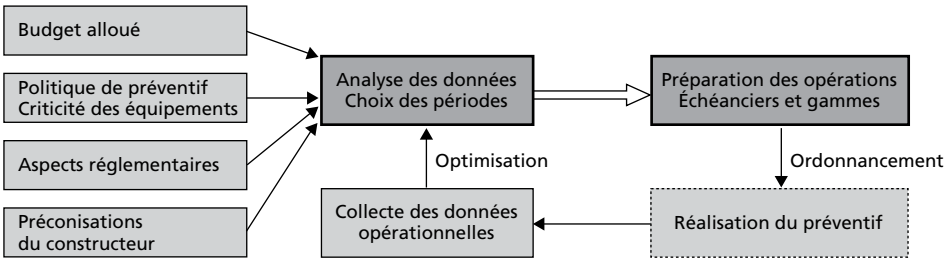


Figure 6.18 – Préparation de la maintenance systématique

En tant qu'analyste, l'agent des méthodes a la responsabilité du choix des unités d'usage (relatives au fonctionnement ou calendaires) et de la prédétermination du nombre d'unités (période *T*).

En tant que préparateur, il doit établir l'échéancier relatif à un équipement, assurer la cohérence des échéanciers au niveau du site et rédiger les gammes pour chaque type d'I_{ps} (figure 2.6). Le préparateur doit élaborer, pour chaque équipement « sensible » bénéficiant d'une maintenance préventive :

– le plan de maintenance préventive de l'équipement, synthèse des prises en charge préventives ;
– les consignes permanentes (fréquences de 1 jour à 1 semaine) ;
– l'échéancier ABAC-ABAD des visites et des interventions I_{ps} ;
– les gammes de visites et de changements préventifs d'organes (composants, modules ou fluides) ;
– les révisions et autres opérations lourdes de maintenance préventive, avec leurs dossiers d'OTP.

❑ **Consignes permanentes de poste : l'automaintenance**

Rentrent dans ce cadre toutes les procédures de premier niveau de maintenance progressivement transférées aux opérateurs de production, concernant des tâches répétitives simples. Ces tâches, dites d'automaintenance, s'ajoutent aux responsabilités de *conduite de l'équipement* lorsqu'elles sont acceptées par les équipes d'opérateurs

formés à cet effet. L'automaintenance va plus loin, évoluant vers plus d'autonomie : en autodépannage, les opérateurs sont progressivement appelés à prendre des initiatives face à des petites défaillances, des déréglages, des défauts, etc.

□ **Contenu des consignes permanentes de maintien de premier niveau d'un équipement**

Ces consignes, allant du quotidien à l'hebdomadaire, concernent la propreté, les vérifications à l'arrêt, la « surveillance active » en fonctionnement et l'alerte éventuelle (recours aux techniciens de maintenance). À savoir :

– les consignes de nettoyage, de propreté et de rangement ;
– les vérifications visuelles de l'état de zones prédéterminées à l'arrêt et en marche ;
– la surveillance « sensible » du bon fonctionnement (bruits, odeurs, points chauds, etc.) ;
– la surveillance de la normalité de paramètres à relever (pressions, débits, températures, etc.) ;
– les procédures d'alerte en cas d'anormalité constatée (appel maintenance avec ou sans arrêt d'urgence) ;
– la liste des petites actions techniques à mettre en œuvre sans démontage. Quelques exemples : resserrer des vis, retendre une courroie, changer une lampe, une carte électronique ou un filtre, purger un circuit, effectuer des réglages et des étalonnages simples, etc. ;
– la définition des opérations de lubrification : contrôle des niveaux et appoints si nécessaire.

□ **Importance des consignes d'automaintenance**

Il est important que les cadres, la maîtrise et les opérateurs considèrent ces actions comme fondamentales dans une démarche de progrès, et surtout pas de façon péjorative ! Prenons trois exemples.

– Un nettoyage soigneux, au-delà de la qualité visuelle, permet d'éliminer bien des causes de défaillance liées aux saletés (encrassement, colmatage, etc.). De plus, l'action de nettoyage amène à découvrir des défauts (fuites, rayures, jeux, etc.) sources de défaillance ultérieure.
– La fixation d'éléments desserrés réduit les vibrations (balourd, désalignement, etc.) pouvant induire des conséquences graves.
– Le manque de rigueur concernant la lubrification induit des défaillances mécaniques majeures.

L'ensemble de toutes ces actions est du « préventif à la source », générateur de qualité et d'économies substantielles, etc. Nous renvoyons le lecteur au management participatif et au *kaizen*, paragraphe 9.2.

□ **Rédaction des fiches d'automaintenance**

Ces fiches, étant destinées à une équipe d'opérateurs, doivent être :

– élaborées sur le terrain en concertation avec les opérateurs, puis testées pour validation ;
– à disposition immédiate sur le poste (par écran ou papier) ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– « visuelles » : usage de pictogrammes, de codes couleurs, de photos, de schémas simplifiés, etc. ;
– concises (précises et minimales) et non redondantes (économie de saisie) ;
– évolutives : suppression, ajout et modification de procédure possible ;
– minimales au sens des écritures à reporter par l'opérateur : compromis à trouver entre la croix (action faite) et la colonne « observations, suggestions ». Penser à réduire les temps administratifs.

Opération			Résultat			Observations – Suggestions
N°	Pictogramme	Désignation	Fait	Bon	Problématique	
40	☐	Contrôle niveau d'huile (jauge j2 sur photo)	☒	☐	☒	Huile « chargée » peut-être à analyser

Figure 6.19 – Exemple de fiche d'automaintenance

Cette suggestion relative à « l'huile chargée », que l'on pourrait peut-être analyser pour décider d'une vidange anticipée, peut prévenir de gros dégâts éventuels.

❑ Échéanciers de visites préventives

Ils peuvent être présentés sous forme de planning à exploitation visuelle ou intégrés à un système informatique de gestion qui délivre chaque semaine le listing des opérations préventives à réaliser.

Exemple d'application de la méthode ABAC-ABAD aux visites préventives

Les visites préventives d'un équipement sont fixées ainsi :
– opération 1 toutes les 500 heures de fonctionnement relevées sur le compteur ;
– opération 2 toutes les 1 000 heures ;
– opération 3 toutes les 2 000 heures ;
– opération 4 toutes les 4 000 heures ;
– opération 5 toutes les 8 000 heures (coïncidant si possible avec une révision).

Tableau 6.5 – Échéancier de visites préventives systématiques

Heure de marche	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000	…	8 000
Type de visites	A	B	A	C	A	B	A	D	…	E
Opérations	1	1 + 2	1	1 + 2 + 3	1	1 + 2	1	1 + 2 + 3 + 4	…	1 + 2 + 3 + 4 + 5

Pour chaque « opération » sera préparée une « fiche de visite », ou « gamme de visite ». Ici 4 préparations suffisent puisque la révision 5 impliquera sans doute la réalisation d'un dossier complet établi après une inspection préalable de l'équipement.

❑ **Gammes d'interventions préventives systématiques**

Les interventions I_{ps} comprennent les visites et les remplacements systématiques de composants, de fluides ou de modules (sous-ensembles). Les visites de maintenance systématique ont un caractère répétitif, qui permet souvent d'établir une « gamme-type » permanente.

☐ **Contenu d'une gamme-type de visite**

– Le numéro d'OTP, ordre de travail préventif ouvert pour chaque visite préventive.
– La période *T* choisie, comprise généralement entre 1 semaine et 6 mois, ou exprimée en heures de marche suivant ABAC-ABAD (tableau 6.5).
– Les procédures de sécurité : consignations à effectuer, protection individuelle, etc.
– Le titre et la définition de chaque phase 10, 20, 30, etc.
– Le graphe d'enclenchement des phases.
– La durée du chemin critique et les durées prévues de chaque phase.

☐ **Pour chacune des phases**

– Le libellé chronologique des opérations : description détaillée des démontages pour examen de l'état, des cotes et jeux à relever, des mesures électriques à effectuer, des réglages à reprendre, etc.
– Le nombre et la qualification des techniciens.
– L'outillage et les moyens logistiques nécessaires (autres que standard).
– Les matières et rechanges nécessaires (avec BSM).
– Les éléments d'enregistrement avec au minimum le visa « fait » en face de chaque opération et la place dédiée aux « observations-suggestions ».

☐ **Le cas des remplacements systématiques de composants ou de modules**

Ces remplacements concernent soit des composants de faibles coûts, mais dont les conséquences en cas de défaillance sont coûteuses (joints d'étanchéité, balais de moteur, filtres, courroies, etc.), soit des « modules », sous-ensembles sensibles, bien étudiés et dont on a déterminé la période *T* optimisée pour échange standard.

Pour les composants, le remplacement sera intégré par le préparateur à une visite de même période *T* sous la forme d'une « phase » de remplacement.

Le cas du remplacement d'un module est plus délicat, et pose le problème suivant : comment faut-il gérer un remplacement préventif optimisé ?

Soit les périodes « standardisées » à 1 000 et 1 500 heures de la méthode ABABC-ABAD et soit 1 200 heures la période économiquement optimisée (voir § 5.3.5) pour le remplacement systématique d'un module de fiabilité connue. Trois solutions sont envisageables :

– réduire T_{opt} à 1 000 heures entraîne moins de probabilité de défaillances résiduelles avant *T* (C_i diminue), mais une consommation accrue d'un module coûteux (C_m augmente) avec gaspillage du potentiel d'utilisation restant;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– augmenter T_{opt} à 1 500 heures, ce qui entraîne les conséquences inverses (C_m diminue, mais risque que C_i augmente). Dans ces deux cas, l'intervention sera préparée suivant une gamme intégrée à l'I_{ps} d'échéance 1 000 ou 1 500 ;
– individualiser la prise en charge du module, par exception (à justifier) à la règle.

❑ **Les gammes de révision et des autres travaux « lourds »**

Les principes d'élaboration sont les mêmes, pour ce qui concerne la décomposition du travail en phases, puis en opérations, chacune faisant l'objet d'une estimation de temps prévu et d'une définition des moyens et des compétences nécessaires. Certaines phases seront traitées en interne, d'autres seront sous-traitées, ce qui implique d'ajouter à la préparation « technique » la définition des procédures administratives (appels d'offre, contrats, etc.) liées à l'externalisation.

☐ **Quelques remarques**

– Lorsque le graphe d'enclenchement devient complexe ($N > 60$ opérations), il est nécessaire de recourir aux méthodes d'ordonnancement de type PERT (voir Ordonnancement, § 7.2).
– À la différence des visites préventives prédéfinies, le travail de préparation sera précédé d'une expertise du site visant à définir les travaux à réaliser. Ici encore, le dialogue « agent des méthodes-opérateurs » sera une condition de réussite, les révisions étant souvent l'opportunité de réaliser des petites modifications.
– Pour les actions d'amélioration, de modernisation, de rénovation, à partir d'une valeur seuil de devis, la gestion sera transférée aux « études-travaux neufs ».

☐ **Le cas des grands arrêts**

Périodicité : de 1 à 5 ans.

La réussite d'un grand arrêt suppose 0 défaut, 0 surcoût, 0 accident et 0 dépassement de délai. Ce qui implique une préparation rigoureuse lourde (sur plusieurs mois) mais rentable. Par une meilleure organisation des chantiers, par le recours maîtrisé à l'externalisation et par une préparation poussée, il est possible de réduire sensiblement les imprévus et les improvisations, causes de retards, de surcoûts et d'accidents. Chronologie des phases de préparation :

– « état des lieux » sur les secteurs concernés ;
– liste des travaux de maintenance et d'amélioration établie avec les services concernés ;
– synchronisation des tâches par la recherche des « tâches antécédentes » et des priorités ;
– intégration de ces tâches à un outil de gestion de projet (type PERT) ;
– analyse de chaque tâche (temps alloué, effectif et qualifications, ressources matérielles nécessaires) ;
– optimisation des tâches critiques à partir du chemin critique prévu ;
– consultations des tâches à externaliser plusieurs mois à l'avance. Il est possible de laisser le prestataire réaliser sa propre préparation (moyens, délais et prix) et de comparer ;

– anticipation de la procédure de gestion des travaux imprévus, de façon à minimiser leur impact ;
– définition stricte des contrôles et des essais, le démarrage devant amener une disponibilité immédiate des installations.

Notons que certaines entreprises de services peuvent préparer et gérer ces grands arrêts (voir § 8.4.5).

❑ Préparation des tâches de lubrification

Historiquement, la « corporation des graisseurs » était une entité à part, bien qu'appartenant à l'entretien. Cette responsabilité est aujourd'hui intégrée à la maintenance préventive, systématique et conditionnelle.

Sur le plan technique, le défaut de lubrification est une cause première de bien des défaillances majeures. Ce défaut de lubrification peut provenir :
– d'un lubrifiant mal choisi, ou détérioré par effet thermique ou vieillissement en stockage ;
– d'un manque de lubrifiant, avec pour conséquence la rupture d'un film d'huile, par exemple ;
– d'un « trop plein » d'huile, qui conduit à un échauffement et à une dégradation du lubrifiant ;
– d'un lubrifiant pollué (ou contaminé), car trop chargé de particules.

Sur le plan organisationnel, la prise en charge de la lubrification s'intègre naturellement dans les actions de maintenance préventive. À ce titre, les procédures de lubrification sont préparées et intégrées aux consignes permanentes d'automaintenance pour les tâches de surveillance et aux I_{ps} de remplacements (de fluide) pour les vidanges systématiques. Un « plan de lubrification » de synthèse peut être préparé pour chaque équipement.

☐ Tâches de lubrification

– La surveillance systématique des systèmes de filtration.
– La surveillance systématique des organes d'étanchéité.
– La surveillance systématique des niveaux.
– Les prélèvements périodiques aux fins d'analyse.
– Les appoints et les vidanges « systématiques » ou « conditionnelles ».

☐ Rôle du préparateur : le plan de lubrification

Sa responsabilité commence, à partir des préconisations des constructeurs, à réaliser la « standardisation » des lubrifiants, de façon à réduire le nombre de références. L'établissement de cette nomenclature interne est fait en partenariat avec le fournisseur « pétrolier » choisi. Le problème à résoudre est d'établir le « plan de graissage » d'un équipement donné en appliquant :
– à l'endroit voulu (schéma des « points de graissage » en 3 D) ;
– au moment choisi (échéancier des visites) ;
– par un personnel qualifié (répartition entre opérateurs et/ou techniciens de maintenance) ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– avec un matériel adapté (définition des moyens requis) ;
– une quantité opportune (prédéterminée après vidange ou estimée pour appoint complémentaire) ;
– d'un lubrifiant approprié (choisi parmi la nomenclature interne du stock de lubrifiants sélectionnés).

6.5.3 Mise en place d'actions préventives conditionnelles

❑ **En quoi consiste la préparation des interventions préventives conditionnelles I_{pc} ?**

☐ **Rappel de la méthodologie et rôle du préparateur**

Pour un équipement donné, l'agent des méthodes a la responsabilité de chacune des neuf étapes de la méthodologie de mise en œuvre de la maintenance conditionnelle exposée au paragraphe 2.3.2. Les tâches plus spécifiquement de préparation concernent les étapes 4, 7 et 8.

Étape 4 – Choix du mode de collecte des informations

Dans le cas de rondes de relevés de paramètres, le préparateur doit déterminer la fréquence des collectes, la « route », c'est-à-dire l'itinéraire du technicien et estimer la durée de la ronde. Une « fiche de ronde » comportera :

– la route décrite sur un plan avec, pour chaque installation, un schéma localisant les points de mesures à effectuer ou les indications à relever ;
– pour chaque point de mesure, l'outillage nécessaire, (sondes, accéléromètres, appareils de mesures et leur paramétrage, etc.) ainsi que le rappel des valeurs nominales et de seuil d'alerte.

Cette collecte, dans le cas de mesures vibratoires en particulier, peut être chargée directement sur un PC dédié au traitement des informations.

Étape 7 – Définition des procédures après alarmes

À chaque génération d'alarme doit correspondre une procédure destinée, suivant les cas, aux opérateurs sur site, aux techniciens-rondiers ou aux techniciens de service en cas de télésurveillance. La sécurité des personnes et du bien doit guider le préparateur, en fonction de la vitesse de dégradation constatée. La procédure doit préciser la conduite à tenir, entre l'arrêt immédiat ou la poursuite en mode dégradé. L'atteinte d'un seuil d'alarme génère un ordre de travail préventif OT_p.

Étape 8 – Organisation de l'intervention préventive conditionnelle (I_{pc})

La préparation anticipée de l'I_{pc} se fera à l'identique d'une intervention corrective I_c attendue. Le bon de travail préventif BT_p sera accompagné éventuellement d'une gamme d'intervention.

❑ **Mise en œuvre d'analyses-diagnostic de vibrations**

Les analyses de vibrations représentent un outil de base de la maintenance conditionnelle, éprouvé depuis longtemps : pensons au mécanicien qui collait son oreille contre le manche d'un tournevis au contact d'un palier ! Ce domaine très

évolutif est abondamment traité par de nombreux ouvrages et articles qui traitent spécifiquement de ce sujet à forte potentialité.

La mise en œuvre des mesures vibratoires dans le cas d'une surveillance centralisée sort du cadre de la seule « préparation » du travail. Aussi n'analyserons-nous que le cas d'une surveillance intermittente, la plus fréquente en PME, à partir de mesureurs analogiques ou des collecteurs de données qui les remplacent progressivement.

☐ Surveillance vibratoire intermittente en off line

Mode opératoire : le matériel est un collecteur de données portatif, doté d'une mémoire qui enregistre une série de mesures collectées au long d'une « route » préétablie allant d'un point de mesure à un autre. À l'issue de la tournée, les mesures sont chargées dans un ordinateur et traitées par un logiciel spécifique.

Certains matériels signalent immédiatement sur le site le dépassement d'un seuil, ce qui a l'avantage de permettre de décider en temps réel la mise en œuvre de mesures complémentaires pour corrélation, diagnostic et décision rapide.

Point important : la crédibilité de l'outil repose sur la « reproductibilité des mesures » pour comparaison et graphes d'évolution, ce qui suppose une fixation correcte du capteur sur la machine, à un endroit précis et bien choisi. L'idéal est qu'il soit prévu à la conception (un taraudage borgne suffit). À défaut, un support magnétique ou un collage est préférable à la « pointe de touche » non fidèle. Notons la possibilité d'utiliser une boîte de jonction, reliée à des capteurs permanents (coût, etc.) sur laquelle se branche le collecteur lors de la tournée.

☐ Préparation : définir la route et les points de mesure

La « route » doit définir la succession des machines prises en charge, et pour chacune d'elle, la chronologie des mesures à entrer en mémoire dans le collecteur. L'interprétation sera d'autant facilitée que le spectre vibratoire s'appuie sur la connaissance spatiale de la zone surveillée. D'où l'intérêt de mesures 3 axes telles qu'illustrées sur l'exemple du palier (tableau 6.6).

Tableau 6.6 – Relevé de mesures pour un palier

Palier	Horizontale	Axiale	Verticale
Amplitude en μm			
Vitesse en mm.s^{-1}			

☐ Préparation : définir la nature des mesures et les paramètres de fonctionnement

Il est indispensable de prendre en compte des mesures auxiliaires (paramètres de fonctionnement) qui influencent les signatures vibratoires. Par exemple, la fréquence de rotation, mais aussi suivant les cas, une intensité, une puissance, une pression,

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

une température, etc. Choix des paramètres à mesurer avec leurs unités et éventuellement, la durée de mesurage :

– déplacement, vitesse, accélération, valeur efficace, facteur de crête ;
– niveau global par bandes de fréquences sélectionnées ;
– analyse spectrale (ou fréquentielle) restituant le spectre de vibrations ;
– cepstre (transformée inverse du log du spectre) et détection d'enveloppe (démodulation d'amplitude).

Les deux dernières techniques permettent d'établir un diagnostic, mais requièrent une compétence de spécialiste. Une préparation par « fiche de ronde » est possible pour guider la collecte, mais les matériels actuels intègrent la préparation à partir du logiciel dédié à la maintenance conditionnelle par analyse vibratoire.

❑ Mise en œuvre d'analyses-diagnostic de lubrifiants

□ Principe de l'analyse-diagnostic

Les différentes analyses d'une huile (ou d'un autre fluide tel qu'un réfrigérant) prélevée au cours de son usage dans un matériel mettent en évidence :

– son niveau de dégradation relativement à ses propriétés physico-chimiques (viscosités à 40 °C et à 100 °C, indice d'acide, point d'éclair, etc.) ;
– son niveau de contamination lié aux particules dont elle se charge progressivement ; les particules sont estimées en ppm (parties par million) ;
– la morphologie et la taille des particules métalliques magnétiques (par ferrographie) ;
– la nature du polluant.

L'évolution des résultats d'analyse permet un diagnostic de certains phénomènes pathologiques dont la trace se retrouve dans l'huile, selon un principe identique aux analyses d'urine dans le domaine médical. En particulier, il est possible de corréler les différents types d'usure étudiés au paragraphe 4.2 (adhésive, abrasive, de fatigue, etc.) avec la nature et le taux de particules analysées.

Les moyens nécessaires à l'analyse étant sophistiqués (chromatographie, ferrographie, spectrophotométrie, fluorescence X, etc.), ce service est proposé aux entreprises par les groupes pétroliers fournisseurs de lubrifiants et par quelques laboratoires privés.

□ Champ d'application

Ce service « analyse-diagnostic » concerne :

– les moteurs thermiques, diesel et réacteurs, utilisés dans l'industrie et les transports (flottes marines, ferroviaires, routières, de travaux publics et aéronautiques) ;
– les turbines à gaz ;
– les circuits hydrauliques industriels ;
– les équipements mécaniques lourds contenant une lubrification centralisée ou locale (gros réducteurs de vitesse, par exemple). Roulements, paliers et engrenages ont leur fiabilité conditionnée par le maintien de la qualité du lubrifiant.

☐ **En quoi est-ce un outil de maintenance conditionnelle ?**

Le suivi de l'évolution des caractéristiques d'une huile industrielle peut permettre :

– de fixer un seuil de détérioration physico-chimique (compatibilité des qualités du lubrifiant avec les conditions d'exploitation) au-delà duquel il est nécessaire de vidanger le lubrifiant ;

– de fixer des seuils sur les taux de métaux en suspension, exprimés en ppm, au-delà desquels il faut arrêter l'exploitation du système. La connaissance approfondie de la technologie du système permet à un spécialiste de proposer un « diagnostic » lié à la localisation probable des zones libérant les particules, suivant leur nature : Fe, Cu, Pb, Ni, Mn, Mo, Si, K, Na, etc. Mais jouer avec des ppm n'a de signification que si les conditions du prélèvement sont bien définies et soigneuses !

Lorsqu'un seuil est proche ou qu'il est atteint, le diagnostic réalisé permet de préparer, puis de planifier une intervention préventive conditionnelle bien moins grave de conséquences que l'intervention corrective évitée.

☐ **Exemple 1 : cas d'un moteur thermique**

Dans un moteur Diesel, l'augmentation du ppm de sodium indique une fuite d'eau par fissuration progressive probable du joint de culasse (Na est contenu dans l'antigel de l'eau de refroidissement). Des prélèvements réguliers permettent de détecter l'apparition, puis l'évolution de la fissure, puis le franchissement d'un seuil qui implique le changer le joint de culasse en « préventif conditionnel » à un moment de disponibilité du système. Attendre la défaillance « extérieurement détectable » reviendrait à une intervention corrective bien plus coûteuse.

Il est ainsi possible d'évaluer l'état mécanique du moteur (usure des parties hautes ou basses) suivant les ppm et la nature des métaux détectés en suspension dans l'huile. Grâce à ces analyses, les taux de pannes « en ligne » ont ainsi été considérablement abaissés sur toutes les flottes de transport.

☐ **Exemple 2 : cas d'un circuit hydraulique**

La qualité de l'huile hydraulique est le garant de la fiabilité et de la longévité d'un système hydraulique. A contrario, la cause première de la majorité des défaillances hydrauliques est une dégradation de la qualité de l'huile.

Le suivi des caractéristiques de l'huile et du niveau de contamination permet de surveiller l'efficacité de la filtration, de localiser les usures dans certains composants et de maintenir la qualité de l'huile par une vidange effectuée « au bon moment » par compromis économique et technique.

☐ **Processus de mise en œuvre**

La figure 6.20 illustre la procédure de l'analyse de lubrifiant, à partir de l'organisation de l'entreprise et celle du prestataire de service.

☐ **Rôle du préparateur**

Au niveau des prélèvements

Il doit déterminer les périodes de prélèvements de lubrifiants exprimées en unité d'usage (kilomètres parcourus ou temps compteur) et à les intégrer (si possible)

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

dans l'échéancier des visites préventives systématiques. Cette opération de prélèvement exige une procédure bien définie en terme de soin : où, quand et comment faut-il prélever l'échantillon. Faute de ces précautions initiales, les résultats ne seraient pas exploitables.

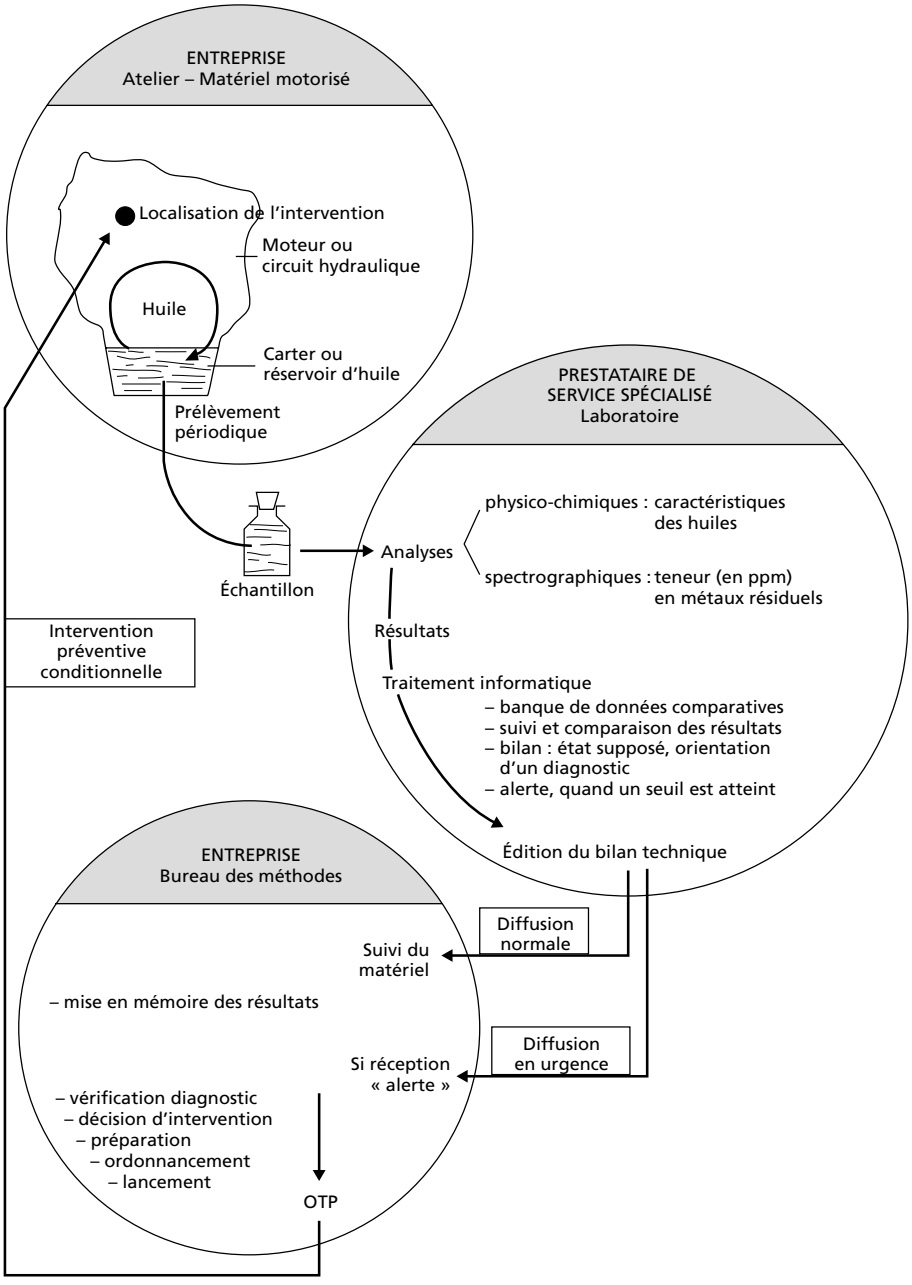


Figure 6.20 – Processus de « l'analyse-diagnostic » des lubrifiants industriels

Au niveau de l'intervention conditionnelle

À la réception d'une « alerte », il doit profiter du diagnostic ou de la localisation du problème pour préparer un bon de travail préventif (BT_p) avec gamme éventuelle, puis planifier l'intervention I_{pc}.

6.6 L'aide au dépannage

6.6.1 Aides à la localisation, au diagnostic et au dépannage

❑ Situation du problème

Le dépannage est une action de maintenance corrective, effectuée avec l'objectif de remettre provisoirement le bien défaillant en état de fonctionner. Pour analyser le rôle de la préparation du travail de maintenance face au dépannage, il est nécessaire de bien aborder la question : *qui a la charge du dépannage ?*

□ Réponse de l'entretien traditionnel

La réponse est simple : c'est le dépanneur. C'est logique, puisque c'est son métier. « Plus il y a de pannes, plus je dépanne. Plus je dépanne, plus il y a de pannes. » Cette logique apparente n'engendre malheureusement aucun progrès. Au contraire, à force d'être dépannés, les matériels perdent progressivement leur fiabilité. D'où le cercle vicieux de l'entretien et la nécessité d'en sortir. Ce métier étant considéré avec le plus grand respect pour le nécessaire professionnalisme d'un bon dépanneur. D'où la boutade : « un dépanneur qui cherche, ça se trouve ; un dépanneur qui trouve, ça se cherche ».

□ Réponse en maintenance

La réponse est plus délicate, car en maintenance, l'objectif avoué est de ne plus avoir à dépanner, ou moins souvent. Ce qui passe inévitablement par l'association d'un *dépannage en temps réel* et d'une *réflexion-diagnostic en temps différé*. Ainsi seront associées aux dépannages des mesures correctives sur les causes trouvées. Ces mesures à la fois correctives (par rapport au passé) et préventives (par référence au futur) donnent la clé pour sortir du cercle vicieux. Mais elles ne dispenseront jamais les techniciens de maintenance d'avoir parfois à jouer les pompiers dans l'urgence ou les détectives dans la difficulté de la localisation d'une panne vicieuse.

Dans le cas d'un transfert de charge « maintenance vers production », les opérateurs se voient confier des tâches simples de dépannage ou de réglage, avec l'assistance éventuelle des techniciens de maintenance. Dans cette optique, « l'aide au dépannage » devient un outil à la fois opérationnel et pédagogique indispensable. C'est d'ailleurs la vocation première des systèmes experts de diagnostic, dédiés aux opérateurs de production.

Dans le cadre de ce chapitre consacré à la préparation du travail, le rôle du préparateur est donc logiquement de développer les outils destinés à aider les opérateurs, mais aussi les techniciens de maintenance de l'antenne sectorisée.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ **Localisation et diagnostic, dépannage et améliorations**

☐ **Actions palliatives, curatives et d'amélioration**

« Palliatif » : qui n'a qu'une efficacité momentanée. Le dépannage est une action de nature palliative.

« Curatif » : qui a pour but la guérison. La réparation est une action curative. Les deux agissent sur les organes défaillants localisés, la réparation de niveau 3 nécessitant une mise en œuvre plus lourde que le dépannage, de niveau 1 ou 2.

« Amélioration » : qui a pour but la non-réapparition du problème. L'amélioration vise cet objectif de « vaccin antipannes » par action sur les causes identifiées.

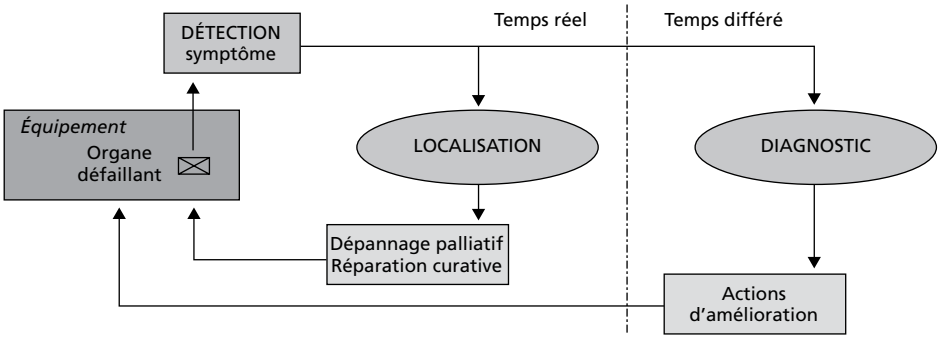


Figure 6.21 – Ne pas confondre aide au dépannage et aide au diagnostic…

☐ **Aide au dépannage ou au diagnostic ?**

L'objet de ce paragraphe est donc bien de recenser les moyens d'aide au dépannage (ou à la localisation) en temps réel. L'aide au diagnostic, fondement de la démarche d'amélioration, est généralement traitée en temps différé. Elle est abordée par ailleurs au paragraphe 4.3, Méthodologie du diagnostic, et au paragraphe 10.5.3, Groupe d'analyse de panne, en particulier. Remarquons à ce sujet le manque de rigueur de l'usage professionnel, bien des propositions d'aide au diagnostic n'étant que des outils d'aide au dépannage.

Pour bien faire comprendre la *nature différente* des actions menées en temps réel ou différé, prenons l'exemple des sapeurs-pompiers forestiers :

– l'action « au feu » implique la mise en œuvre dans l'urgence de moyens élaborés bien maîtrisés par un apprentissage et un entraînement soutenu. Ce qui n'exclut aucunement la réflexion d'adaptation et la coordination (rôle du PC, poste de commandement) dans l'action ;

– la réflexion *a posteriori* (le feu est éteint) organisée en temps différé comporte l'analyse des problèmes rencontrés et la comparaison à l'historique des événements semblables. L'identification des obstacles rencontrés et de leurs causes (*le diagnostic*), la définition de moyens et de procédures plus efficaces constituent la partie positive : c'est par une prise de recul par rapport aux événements que les mesures d'amélioration seront définies.

Les deux organisations sont inexorablement complémentaires, l'efficacité des mesures en « temps différé » ayant pour effet premier de rendre les actions en « temps réel » moins nombreuses, plus faciles et moins dangereuses.

6.6.2 Préparation du dépannage : l'aide au dépannage

❑ **Les deux formes de dépannage**

L'analyse statistique d'un grand nombre de petites interventions correctives, réglages et dépannages confondus, montre l'existence de deux populations :

– des interventions hautement répétitives, intégrées dans la routine professionnelle : « ça se dérègle, je règle » ;

– des interventions très diversifiées en localisation et en nature, auxquelles il faut faire face de façon inattendue.

□ **Cas des dépannages répétitifs**

La tentation est grande d'en déduire : « les connaissant bien, je dois les préparer ». Or, c'est ici un champ d'action « diagnostic » idéal pour chercher à les supprimer, ou en réduire le nombre, pas pour les préparer. Les graphes de Pareto sont un outil privilégié (si ces microdéfaillances sont saisies !) pour que l'agent des méthodes et le GAP (groupe d'analyse de pannes) cherchent à les minimiser de façon sélective.

Cas particulier : dans le cas de l'automaintenance, il est naturel de transférer la prise en charge de ces événements répétitifs vers les opérateurs. Ce qui nécessite de les former et de leur mettre à disposition des outils formalisés d'exploitation simple et visuelle.

Intégrées aux fiches d'automaintenance, ces procédures élaborées à partir des symptômes observables donneront les minigammes de dépannage (réalisables sans démontage au-delà d'un carter), et fixeront les « limites » au-delà desquelles le recours à la maintenance s'impose.

Cette préparation n'est qu'un pis-aller, la bonne solution consistant à supprimer la microdéfaillance, donc la fiche d'automaintenance correspondante.

□ **Cas des dépannages diversifiés**

Face à un symptôme de défaillance, lorsque l'investigation amène le dépanneur sur des voies inédites, le besoin d'une « aide formalisée » complémentaire de la compétence professionnelle se révèle utile.

Beaucoup de ces événements seront résolus par la seule compétence du dépanneur, son métier et son « flair ». D'autres seront moins évidents à résoudre, de par la variété et l'interdépendance des technologies, logiciels y compris. Ces dépannages impliqueront le recours à une aide formalisée spécifique à l'équipement pour éviter le recours à des spécialistes extérieurs. Rappelons quelques paramètres propres au dépannage :

– l'équipement est arrêté ou dégradé : son redémarrage en état de bon fonctionnement n'est pas négociable, son redémarrage dans les meilleurs délais pas beaucoup plus !

– les coûts indirects engendrés par cet arrêt sont souvent disproportionnés au coût direct du dépannage ;

– de ce fait, le dépanneur doit mettre en œuvre une démarche réfléchie en situation de pression (stress) et d'urgence : ce n'est pas simple ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– le dépannage se fait *in situ*, ce qui n'est pas toujours propice à la consultation d'un PC.

☐ **Le déclenchement du dépannage**

Suivant l'organisation du terrain, la procédure de dépannage démarre toujours par une DT (demande de travail) transmise directement au dépanneur en autonomie sur le secteur, ou transitant par le bureau d'ordonnancement pour enregistrement, ouverture de l'OT ou du BPT (bon pour petits travaux) et imputation au « client » demandeur.

Dans tous les cas, la *traçabilité de l'intervention*, même mineure, doit être totale (BT avec le temps passé, même faible et description des opérations réalisées). L'agent des méthodes ne sera informé qu'a posteriori par le retour du BT ou s'il y a problème pendant le dépannage.

❑ **Recensement des outils d'aide au dépannage d'après leur origine**

Au-delà des plans et schémas relatifs à la description d'un matériel, des outils documentaires ou informatiques d'aide au dépannage peuvent être développés et procurés *par le fournisseur* à la livraison du matériel.

– Spontanément, c'est exceptionnel. Mais il arrive parfois de trouver certains manuels de dépannage très bien réalisés, didactiques et opérationnels pour aider les dépanneurs.
– Par négociation avec le fournisseur, c'est à tenter.
– Par disposition contractuelle lors de l'achat (clause de soutien logistique spécifiant la nature de la documentation technique attendue).
– Par contrat de service, sous forme de télédiagnostic par exemple.

À défaut, il reste au préparateur du bureau des méthodes de développer ces aides en interne, ce qui constitue l'essentiel de sa préparation des dépannages.

❑ **Recensement des outils d'aide au dépannage d'après leur nature**

Nous les avons classés du basique au spécifique, en leur conservant leur appellation usuelle d'aide au diagnostic.

☐ **Schémas fonctionnels et dessins**

Ce sont les outils de base à portée de main du dépanneur. Extraits du DTE (dossier technique de l'équipement), et tenus à jour à chaque modification, ils comprennent pour les parties opératives :

– les plans mécaniques d'ensemble et de sous-ensembles,
– les schémas de puissance (hydrauliques, électriques, etc.),
– les grafcets hiérarchisés d'automatisme.

Pour les parties « commande » :

– les schémas des parties commande, avec identification des composants,
– les éléments de programmation des automates,
– les éléments d'interface.

Pour tous les composants, une désignation complète et les références magasin/fournisseurs sont indispensables au dépanneur : que de pertes de temps évitées… Notons que *l'historique de l'équipement* (par consultation locale de la GMAO) peut se révéler utile à l'investigation, un dépannage pouvant en entraîner un autre.

☐ **Tableaux « effets, causes, remèdes »**

Souvent fournis par le fournisseur pour des matériels de grande diffusion, leur usage est simple. Mais ils sont encombrants à développer, étant arborescents : à chaque symptôme sont associées des causes présumées, à chaque cause peuvent correspondre plusieurs actions correctives. De ce fait, ils se révèlent plus utiles pour l'apprenti dépanneur que pour le professionnel, et insuffisants en cas de panne vicieuse.

Tableau 6.7 – Exemple de tableau « effets, causes, remèdes »

Effets visibles (ou constatations ou symptômes)	Causes possibles	Remèdes (ou préconisations)
La broche chauffe anormalement	– ..... – mauvaise arrivée d'huile –	– ..... – nettoyer le filtre – .....

☐ **Tableaux « entrée-sorties » de diagnostic rapide**

À un effet constaté, ils font correspondre plusieurs causes envisageables, sans hiérarchisation : le dépanneur doit donc « arbitrer » entre deux causes, quelle est la plus probable. Le tableau 6.8 donne un exemple : à l'effet B constaté peut correspondre la cause 3 ou la cause 8.

Tableau 6.8 – Structure d'un tableau « entrées-sorties »

Effets	Causes possibles									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	…
A			↑		■	■		↑	■	
B	→	→	■	→	→	→	→	■		
C		■		■						
…										

Ces tableaux ne proposent pas de « remèdes », peu utiles pour un dépanneur dès lors qu'il a situé l'origine de la panne.

L'exemple suivant (figure 6.22), relatif aux défaillances de roulements à billes, est intéressant, car il prend en compte deux entrées « détériorations observées » et « anomalies relevées en fonctionnement » et leur associe une sortie « origine des détériorations ».

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

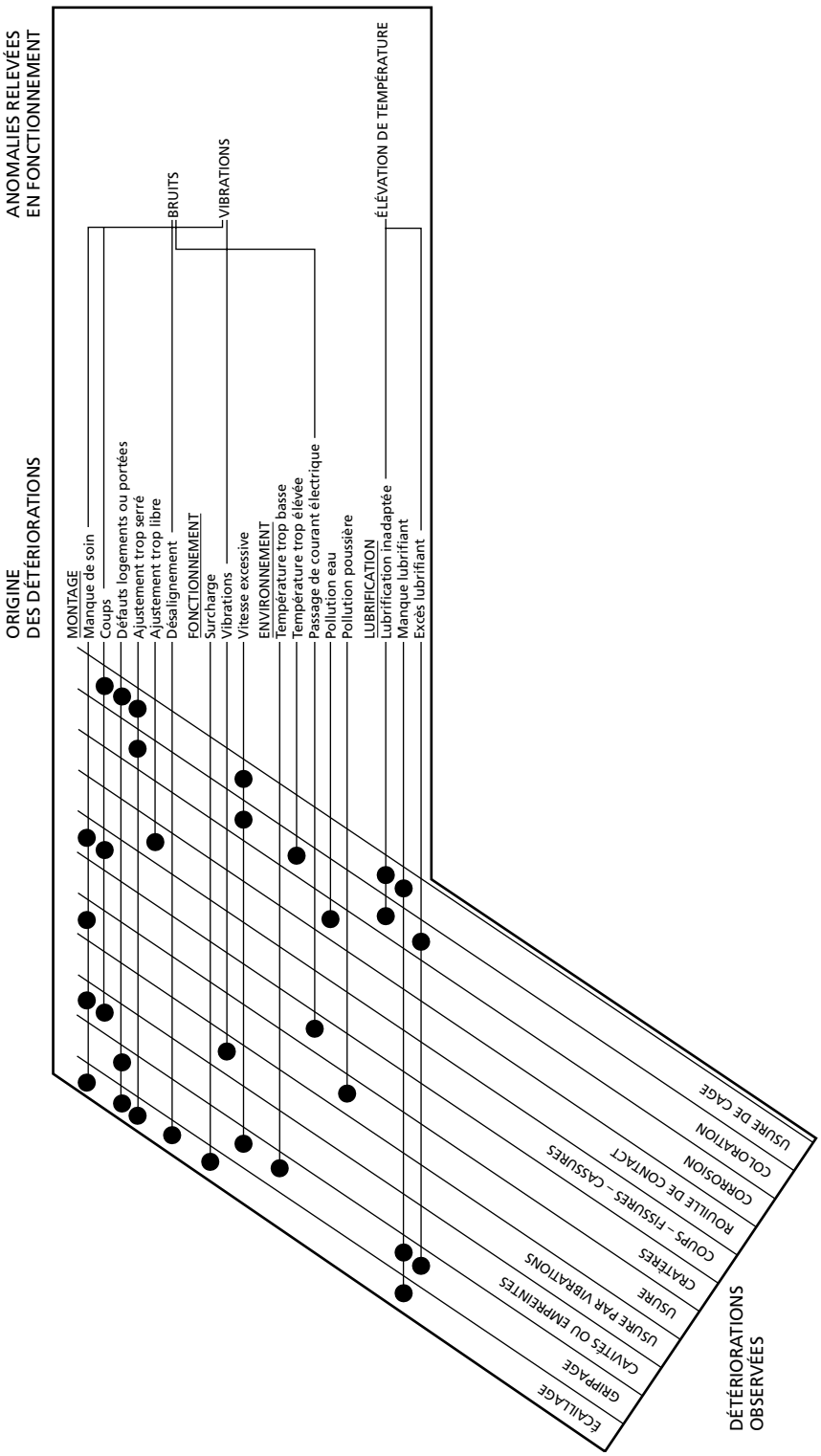


Figure 6.22 – Tableau d'aide au diagnostic de défaillances de roulements

Les anomalies en fonctionnement supposent une surveillance des opérateurs et leur participation au diagnostic. Les détériorations observées supposent une expertise après sciage et polissage du roulement dégradé.

□ Logigrammes de dépannage

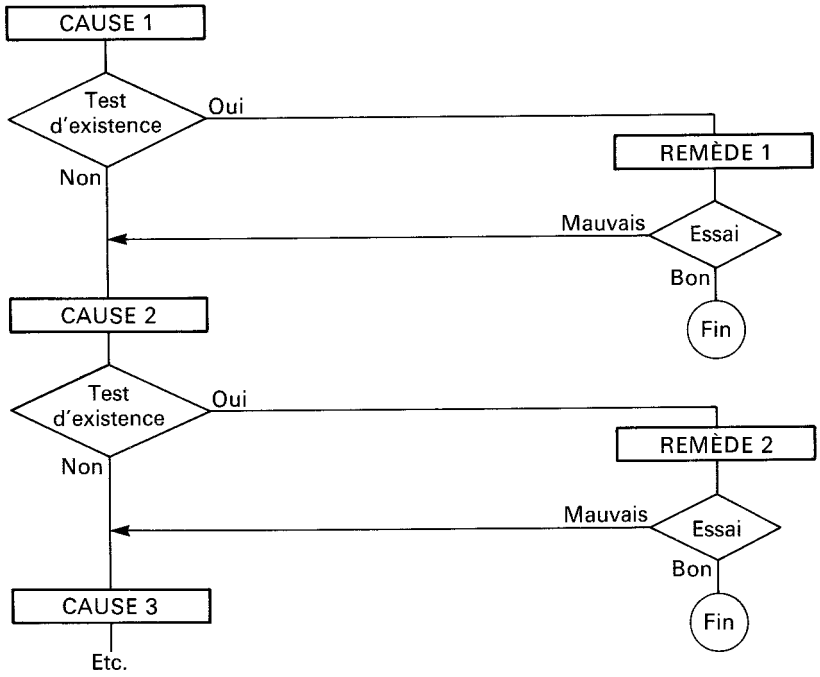


Figure 6.23 – Exemple de structure de logigramme d'aide au dépannage

Cet outil d'aide au dépannage se prête bien à une exploitation informatique. À partir d'un symptôme caractéristique, le logigramme propose une succession de tests d'existence des causes possibles classées suivant leur probabilité d'occurrence. Le REMEDE développé au paragraphe 6.6.3 suivant utilise cette mise en forme, ainsi que certains systèmes experts.

□ Tests de diagnostic

Définition du test : « comparaison des réponses d'un dispositif soumis à une sollicitation avec des réponses de référence ». Des « bancs de test », souvent développés par les fournisseurs spécifiquement à un équipement, permettent la localisation d'un défaut, le contrôle ou un réglage-mise au point.

Exemples

Bancs de tests hydrauliques en maintenance aéronautique, bancs de réglage en automobiles, testeurs de circuit électronique, etc.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Des « tests intégrés » à la conception de systèmes automatisés permettent l'auto-diagnostic par analyse des boucles d'asservissement, mais non la détection de pannes logicielles.

□ **Télédiagnostic**

C'est un outil de dépannage à distance de systèmes dotés d'automates programmables parfois proposé en contrats de maintenance ou comme service. Le client-utilisateur est muni d'une « valise de terminal ». Il consulte par téléphone la banque de données de l'ordinateur SAV qui lui indique les séquences de tests à mettre en œuvre : c'est le « diagnostic à distance », domaine fortement évolutif.

□ **Systèmes experts de diagnostic**

Les progrès de l'informatique ont permis le développement des systèmes experts qui rassemblent des « faits » identifiés sur un système, les confrontent aux connaissances « d'experts », proposent une succession de tests, puis des remèdes à mettre en œuvre. Le principe de fonctionnement schématique est donné par la figure 6.24.

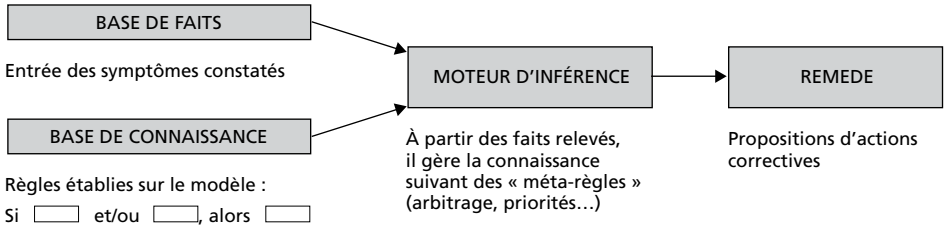


Figure 6.24 – Structure d'un système expert

La base de connaissance est extraite du savoir et du savoir-faire du ou des experts du domaine concerné. Sa représentation se fait le plus souvent par utilisation de règles de production du type : SI (condition a, condition b…) ALORS (action a, action b…).

La base de faits est « l'espace de travail » du système expert. Elle contient les éléments connus de l'étude. Elle s'enrichit au fur et à mesure de l'utilisation du système. Le moteur d'inférence déduit de nouveaux faits en utilisant les règles contenues dans la base de connaissance.

La vocation d'un système expert est de « simuler le comportement de l'expert », de mettre ce comportement à disposition d'un utilisateur. Les systèmes experts de dépannage, situés chez l'utilisateur ou chez le fournisseur, sont principalement destinés à l'automaintenance par des opérateurs pour les systèmes simples ou aux techniciens-dépanneurs pour des systèmes plus sophistiqués. Les écrans de tests et de propositions d'action de dépannage doivent être très « visuels » pour ne pas engendrer de confusion.

Des difficultés freinent l'expansion des systèmes experts : l'extraction des connaissances de l'expert, qui a des difficultés à formaliser et à ordonner ses connaissances, leur utilisation « peu valorisante » sur le terrain, leur justification économique non évidente et leur champ d'application mal connu par l'industrie.

Par contre, ils sont toujours l'objet de recherches évoluées dans le domaine de l'intelligence artificielle (démarche heuristique appuyée sur une stratégie pas à pas, par opposition à la démarche algorithmique des tests).

6.6.3 Une méthode de préparation intéressante : « REMEDE »

REMEDE, ou « recherche méthodique des défaillances », est une méthode d'aide au dépannage développée par la CEGOS comme thème de cercles de qualité. Cette démarche structurée se finalise par un logigramme de test suivant la figure 6.23, d'où l'on peut tirer des fiches d'autodépannage.

□ **Méthodologie en 10 étapes**

1. Sélection d'un équipement soumis à des dépannages nombreux et délicats.
2. Rassembler les parties concernées : en production, opérateurs et régleur ; en maintenance, technicien de l'antenne et l'agent des méthodes-préparateur du secteur.
3. Décomposition fonctionnelle de l'équipement.
4. Lister pour chaque organe toutes les causes possibles de défaillance.
5. Définir l'effet observable que chaque défaillance induira sur l'équipement.
6. Déterminer le test de dépistage correspondant à chaque défaillance, et les moyens nécessaires.
7. Définir le remède à apporter : description du dépannage et des moyens requis.
8. Classer les tests et les dépannages suivant deux critères : facilité et rapidité.
9. Formaliser le logigramme de dépannage (figure 6.23).
10. Rédiger les fiches d'autodépannage.

□ **Points particuliers**

Étape 5

Étape importante puisqu'il s'agit d'identifier les effets visibles sur site par l'opérateur. La méthode consiste à construire un arbre des causes à quatre niveaux, ainsi que l'illustre la figure 6.25 relative à l'exemple d'une chaîne de conditionnement de paquets de café.

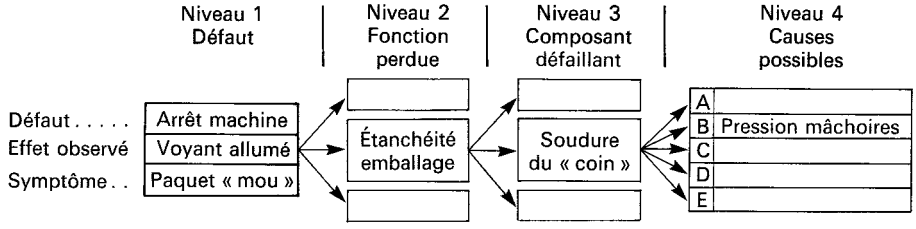


Figure 6.25 – Arbre à quatre niveaux de causes

Étape 8 : classement des tests et les dépannages

L'objectif est de séparer les tests et les dépannages que l'opérateur peut prendre en responsabilité de ceux qui requièrent un technicien de maintenance. Sans oublier que la fonction première de l'opérateur est de conduire son équipement.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Une matrice permet cette répartition des responsabilités, la zone A étant prise en charge en autodépannage, la zone B pouvant progressivement le devenir. En zone C, l'appel à la maintenance est obligatoire (tableau 6.9).

Tableau 6.9 – Matrice de répartition des responsabilités

RAPIDITÉ/ FACILITÉ	Rapide (< 1 minute)	Court (entre 1 et 5 minutes)	Long (> 5 minutes)	Commentaires
Très facile	A	A	B	Ni démontage, ni outillage, ni formation
Facile	A	A	B	Démontages simples, outillage de base
Moyen	B	B	C	Outillage spécifique, formation utile
Difficile	C	C	C	Avec démontage et formation au dépannage nécessaire

Étape 9 : établissement du logigramme

Les entrées du logigramme (voir figure 6.23) sont constituées de la liste des défauts recensés. À partir d'un défaut sélectionné, les causes sont envisagées par ordre décroissant de probabilité, leurs tests associés étant classés à partir du plus rapide et simple (matrice 6.9). Lorsque l'opérateur, ayant affiché un défaut constaté, atteint un écran de PC comprenant un test ou un dépannage de la zone C, il appelle la maintenance.

Étape 10 : rédaction des fiches d'automaintenance

À chaque dépannage de la zone A, éventuellement B correspondra une fiche, mini-gamme d'intervention axée sur une description « visuelle » des points d'intervention. En zone C, le préparateur jugera si une gamme d'intervention est utile au dépanneur.

□ **Conclusions**

Il restera à enrichir progressivement le fichier à partir des nouvelles défaillances qui pourront survenir et à enregistrer le nombre des « consultations ». Cette méthode, menée par exemple sous forme de cercles de qualité mixte, a des effets induits positifs :

– elle participe à la formation technique des opérateurs en présence des dépanneurs, développant l'usage d'un vocabulaire commun et favorisant un dialogue que l'on sait fructueux;
– elle est l'occasion de rechercher des causes de défaillances, ce qui peut permettre de les prévenir et ce qui est mieux que de les dépanner.

7 • LES FONCTIONS ORDONNANCEMENT, LOGISTIQUE ET RÉALISATION

7.1 L'ordonnancement des tâches de maintenance

7.1.1 Rôle de l'ordonnancement en maintenance

L'ordonnancement représente la fonction « chef d'orchestre ». Dans un service maintenance caractérisé par l'extrême variété des tâches en nature, en durée, en urgence et en criticité, l'absence du chef d'orchestre débouche vite sur la cacophonie quel que soit le brio des solistes. L'ordonnancement se situe entre la *fonction méthode,* chargée de la définition des tâches à effectuer et des moyens à mettre en œuvre, et la *fonction réalisation* chargée de leur exécution.

Le terme ordonnancement est souvent remplacé par le terme planification dans les entreprises. Mais pour nous et selon les normes, l'ordonnancement est une planification qui prend en compte les moyens et les ressources disponibles.

❑ Missions de l'ordonnancement

Ayant la responsabilité de la conduite et de la synchronisation des actions de maintenance internes ou externalisées, la fonction ordonnancement a pour mission :

– de prévoir la chronologie du déroulement des différentes tâches ;
– d'optimiser les moyens nécessaires en fonction des délais et des chemins critiques ;
– d'ajuster les charges aux capacités connues ;
– de lancer les travaux au moment choisi, en rendant tous les moyens nécessaires disponibles ;
– de contrôler l'avancement et la fin des travaux ;
– de gérer les projets (prévision, optimisation logistique, avancement et respect des délais) ;
– d'analyser les écarts entre prévisions et réalisation.

Cela peut s'exprimer sous la forme : prévoir un instant t et un endroit x où un personnel p muni d'un outillage o et des matières m exécutera la tâche M en harmonie avec les autres travaux connexes.

Cette fonction stratégique est peu visible (effectif dédié faible) et souvent peu étudiée, mais elle repose sur des méthodes à connaître. Son absence ou son insuffi-

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

sance est par contre fort visible : tâches préventives négligées, gaspillage de temps en recherche de moyens indispensables, améliorations toujours reportées à plus tard, techniciens parfois inoccupés associés à des heures supplémentaires évitables, etc.

❑ Difficultés inhérentes à l'ordonnancement en maintenance

□ Quelques spécificités en matière d'ordonnancement

Il est incontestable que la diversité des actions de maintenance complique leur programmation :

– d'une durée de quelques secondes en automaintenance à des milliers d'heures pour des chantiers lourds de type arrêt périodique d'unité de production. Dans le premier cas, le besoin du client est satisfait par une grande réactivité. Dans le second, il est satisfait par le respect du délai et la qualité du travail ;
– du systématique planifié 6 mois à l'avance au correctif fortuit, au mauvais endroit et au mauvais moment ;
– de l'urgent à faire sans délai à l'amélioration dépourvue de délai et toujours remise à demain.

L'organisation à mettre en œuvre doit tenir compte de cette variabilité : légère et souple pour assurer la réactivité d'équipes de terrain, logistique lourde pour la gestion des arrêts.

Autre difficulté, la production étant maîtresse de ses arrêts planifiés, la maintenance se retrouve logiquement dans une situation de dépendance. Une bonne synchronisation est indispensable entre les services ordonnancement afin de profiter des arrêts de production (formatage, chômage technique, etc.) pour réaliser des opérations de maintenance.

□ Réussir la gageure de la prévision du fortuit…

Mais la principale difficulté vient du caractère fortuit de la panne : comment intégrer l'imprévisible aux prévisions, ou comment intégrer des dépannages à un planning ?

Certains services maintenance prennent prétexte de cette apparente contradiction pour ne pas ordonnancer leurs activités. Si 90 % de leurs activités sont fortuites, ils ne peuvent guère faire autrement. Mais si, grâce à une efficace politique préventive, les dépannages ne représentent que moins de la moitié de la charge de travail, alors ce fortuit devient prévisible et facilement programmable !

En effet, l'organisation du service maintenance doit « coller » à ces difficultés pour les résoudre sinon harmonieusement, du moins en « lissant » les imprévus : si l'on sait, par retour d'expérience des années passées, que 21 % de la charge de travail annuelle est constituée de petits dépannages fortuits, nous réserverons pour chaque unité d'ordonnancement 21 % de la capacité. 21 % la semaine prochaine, puis demain 21 % de la capacité disponible pour dépanner, etc. Ce qui s'avérera insuffisant et trop pessimiste demain, et optimiste après-demain, puis à la longue progressivement bien ajusté !

De la même manière que si l'on est parfaitement incapable de prédire « pile ou face » pour un événement, nous savons parfaitement le prévoir avec d'autant moins d'erreur relative que le nombre N d'événements croît. Cette estimation statistique de charge se nomme la « charge réservée ».

7.1.2 Terminologie de l'ordonnancement

L'ordonnancement utilise un vocabulaire spécifique qu'il est indispensable de définir avant d'aborder les méthodes à utiliser pour gérer les activités de maintenance.

❑ **Notions de charge et de capacité**

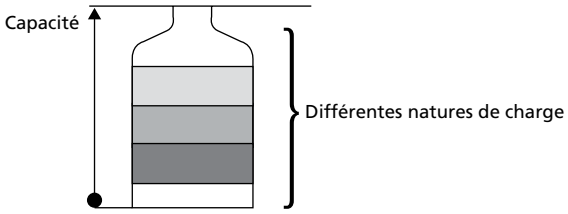


Figure 7.1 – Charges et capacité

□ **Capacité de charge**

Elle est illustrée par la notion de « contenant », estimée par le potentiel d'heures qu'une équipe représente, dans les horaires normaux de travail. C'est une valeur facile à estimer et sensiblement constante.

Exemple

Une équipe d'antenne de maintenance formée de 8 techniciens représente une capacité de 8 × 35 heures/semaine = 280 heures, soit 13 160 heures/an avec 5 semaines de congés.

Nous distinguerons la *capacité théorique*, que nous venons d'estimer, et la *capacité réelle,* estimée en retranchant les absences prévisibles, qu'elles soient prévues (formation) ou non prévues (taux d'absentéisme).

□ **Charges de travail**

C'est la notion de « contenu » matérialisée par le cumul des temps prévus affectés à une équipe (ou un technicien) pour une période de temps de référence nommée « unité d'ordonnancement ». Ce contenu est constitué de « strates » de travaux de natures différentes que l'on peut gérer : c'est une des missions de l'ordonnancement d'arriver à équilibrer les charges et les capacités.

□ **Surcharges**

Elles se manifestent évidemment lorsque la charge est supérieure à la capacité, en supposant le temps « incompressible ». Comme 1,5 litre ne rentre pas dans une bouteille d'un litre, il faut trouver des solutions après analyse des causes et estimation du pourcentage de surcharge. Nous distinguerons donc les surcharges de nature permanente ou de nature conjoncturelle.

Solutions envisageables pour les surcharges permanentes

1. Repenser la politique de maintenance, sachant :
– que le préventif diminue naturellement la charge corrective, mais aussi la charge totale ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– que le développement continu des « améliorations » diminue les taux de défaillance, donc la charge corrective ;
– que le développement des méthodes-ordonnancement optimise les temps d'opération et les aléas logistiques ;
– que les effets de ces politiques ne seront pas immédiats !

2. Externaliser les travaux éloignés des pôles de compétence des techniciens (recentrage sur le « métier »).

3. Supprimer certains travaux (ils étaient donc inutiles ?).

4. Augmenter la productivité des techniciens par la motivation : mais attention à ce que le gain de productivité ne se fasse au détriment de la qualité des interventions.

5. Transférer les travaux de niveaux 1 et 2 sur la production, dans une logique TPM.

6. Embaucher du personnel, pour augmenter la capacité tout en sauvegardant le savoir-faire interne relatif au maintien de la production.

Solutions envisageables pour pallier les surcharges conjoncturelles

1. Recourir aux heures supplémentaires (coûteux et fatigant).

2. Demander un effort ponctuel d'efficacité.

3. Recourir à la sous-traitance, sachant qu'elle se prête mal à une négociation dans l'urgence.

4. Renforcer les équipes, soit par transfert interne, soit par recours à l'intérim.

5. Chercher des priorités d'urgence et reporter certains travaux.

6. Remplacer une réparation par un échange standard plus rapide.

7. Panacher ces solutions.

Remarque

Ce sont les services maintenance les plus surchargés qui ont le plus besoin d'une remise en cause de leurs méthodes et ordonnancement, et qui ne les remettent pas en cause, puisque surchargés…

☐ **Sous-charges**

Elles correspondent bien sûr à une surcapacité, de caractère permanent ou conjoncturel. Conjoncturelles, elles rendent disponible du personnel, ou bien elles sont masquées par la « volatilité » du temps de charge qui ajuste par miracle la charge à la capacité. Permanentes, elles posent le problème critique du sureffectif.

❑ Notions de tâche et de projet

☐ **Notion de tâche**

La « phase » des méthodes devient la « tâche » caractéristique du vocabulaire propre à l'ordonnancement. *Une tâche est un ensemble d'opérations qu'il est logique de grouper afin de les confier à une même équipe d'intervention, dont le début et la fin sont bien définis et dont le contenu est contrôlable.* La situation d'une tâche dans le temps implique la définition des notions illustrées par la figure 7.2.

A priori, la planification s'opère en plaçant chaque tâche « au plus tôt ». Les tâches peuvent être « en série » lorsque existe une contrainte d'antériorité du type « B

débute lorsque A est terminé » ou en parallèle si cette contrainte n'existe pas (tâches indépendantes).

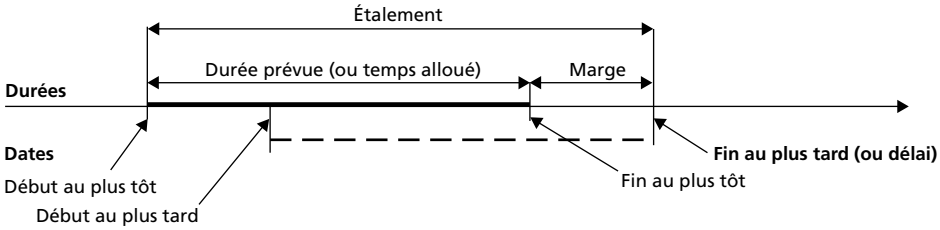


Figure 7.2 – Vocabulaire de la tâche

☐ Notion de projet

Un « projet » est un ensemble décomposé en tâches élémentaires auxquelles le préparateur a attaché une durée prévue et a défini la liste des tâches *antécédentes* : « pour que M débute, il faut que K et L soient terminées ».

Exemples

Révision périodique d'un équipement, arrêt annuel d'une unité de production, etc.

Jalonnement : c'est l'ensemble des dates relatives à la succession des tâches qui caractérise le projet.

Chemin critique : c'est l'ensemble des tâches « en série » qui conditionne le délai final du projet (ou programme).

Délai de projet : c'est la date de fin de la dernière tâche critique. C'est également une contrainte technique ou commerciale (éventuellement associée à des pénalités de retard) s'appliquant à l'achèvement du projet (ou d'une tâche critique).

❑ Notion de planning

Le planning est un outil prévisionnel, application du diagramme de Gantt, qui *visualise,* sur panneaux muraux ou sur écran, la succession des tâches caractéristiques d'une période d'activité. Il peut prendre des formes matérielles très diverses (traits, rubans, cartons ou ficelles de couleurs). Par extension, on nomme parfois « planning » le service chargé de la programmation.

☐ Principe du diagramme de Gantt

Il est structuré à partir d'une échelle des temps nommée « unité d'ordonnancement » : jour décomposé en heures, semaine décomposée en jours, année décomposée en semaines, etc. Chaque tâche est représentée par une barre de *longueur proportionnelle au temps prévu*, et elle est positionnée a priori « au plus tôt ».

Le même outil peut représenter la succession des étapes d'un projet (cas de la figure 7.3) ou une succession de tâches indépendantes. Sur l'exemple, la tâche antécédente A libère les tâches B et C, la tâche B étant margée, ce qui donne une liberté pour « lisser » la charge. Le *lissage* consiste à jouer sur la liberté de program-

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

mation offerte par les marges pour régulariser la charge totale à un instant donné, ou à gérer différentes contraintes afférentes au projet.

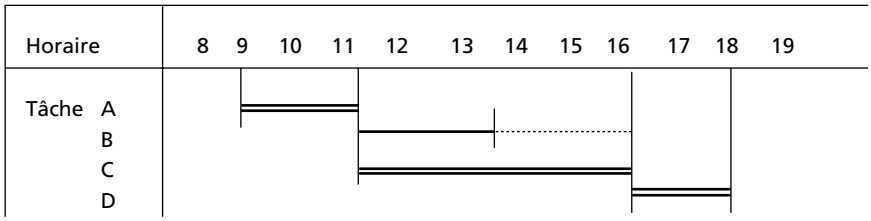


Figure 7.3 – Structure d'un graphe de Gantt

Le graphe de Gantt est un outil « naturel » et « visuel » très polyvalent dans ses applications et dans ses formes matérielles.

☐ Tâche critique et chemin critique

Le graphe de Gantt appliqué à la gestion d'un projet met en évidence une succession de tâches « en série » (A, C, D dans notre exemple) et non margées : ce sont les tâches critiques dont l'enchaînement forme le chemin critique et conditionne le délai final. Tout retard sur une tâche critique se répercute dans le délai.

❑ Les trois horizons : le partage des compétences et des responsabilités

☐ Principe de base

« On ne voit distinctement que ce qui est près » et « Pour voir au loin, il faut s'élever ».

Le premier truisme montre qu'il est bien inutile de vouloir tenir des plannings d'activités de maintenance en dehors d'un futur probable et lisible. Plus la prévision est lointaine, plus elle doit être globalisée. Plus elle est proche, plus elle doit être détaillée.

Le second truisme propose un partage de responsabilités ainsi qu'un modèle d'organisation à partir de trois horizons de programmation, à court, moyen et long terme (figure 7.4).

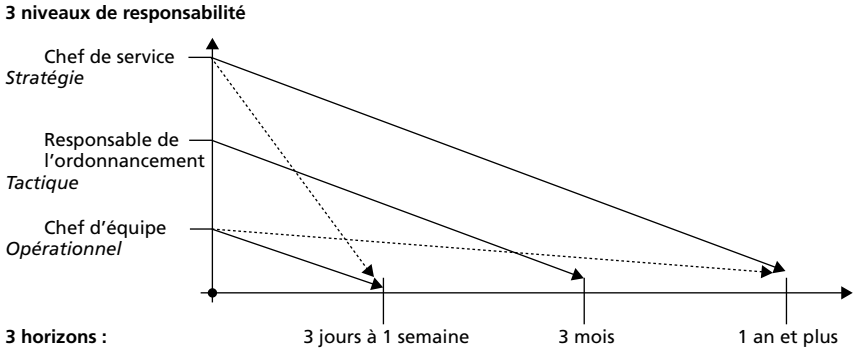


Figure 7.4 – Le partage des responsabilités de programmation en maintenance

☐ **Horizon à long terme**

Le responsable du service maintenance a la responsabilité naturelle de prévoir les ajustements du « plan de charges annuel » avec les capacités, par extrapolation des bilans d'activités des années passées. Cette analyse est réalisée :

– en tenant compte des perspectives de l'entreprise et de sa conjoncture économique;

– en intégrant les contraintes et les projets nouveaux;

– en identifiant les phénomènes structurels affectant les charges ou les capacités.

Elle s'apparente et est liée à l'analyse budgétaire qu'elle doit précéder. Cette indispensable réflexion prospective en phase avec le futur de l'entreprise doit déboucher sur des choix et des décisions à l'horizon « 1 an » en terme d'effectif, de choix des travaux et de politique d'externalisation.

☐ **Horizon à moyen terme**

C'est le domaine de responsabilité de l'agent d'ordonnancement, « chef d'orchestre » des activités du service maintenance. Il organise les activités à l'horizon 3 mois et les « lance » chaque semaine en direction des équipes de terrain. C'est ce profil de compétence que nous allons approfondir dans ce chapitre, car de lui dépend pour une bonne part l'efficacité du service maintenance. Ce que l'on vérifie le plus souvent par défaut.

☐ **Horizon à court terme**

La vocation naturelle d'un chef d'équipe est d'assurer la répartition équilibrée du travail des membres de l'équipe, en fonction de leur spécialisation, de leurs compétences et de leur disponibilité. Cela pour un horizon allant du futur immédiat (cas du dépannage urgent) à 3 jours pour le « planning d'atelier » (voir figure 7.8) et à la semaine pour le listing des travaux à effectuer.

7.1.3 Les niveaux de l'ordonnancement et leurs outils

❑ **Les cinq niveaux de l'ordonnancement**

Nous allons distinguer cinq niveaux s'échelonnant dans le temps, allant du futur à long terme au passé immédiat suivant le tableau 7.1.

Tableau 7.1 – Les cinq niveaux d'ordonnancement en maintenance

Niveau	Nom	Horizon	Responsable
1	Plan de charge annuel	1 an	Chef de service
2	Plan de charge prévisionnelle	3 mois	Agent d'ordonnancement
3	Planning de lancement	1 semaine	Agent d'ordonnancement
4	Planning d'atelier	1/2 semaine	Chef d'équipe
5	Suivi de l'avancement	Passé immédiat	Agent d'ordonnancement

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Niveau 1 : le plan de charge annuelle

Il s'agit de recenser les activités sur l'année qui vient, à partir de deux bases.

– La prévision statistique, par extrapolation des années passées, pour toutes les activités « stabilisées » caractéristiques du service maintenance, exprimées en pourcentage de la capacité de charge. Ce qui suppose la maîtrise des temps d'activités passés les années antérieures, mis en familles (préventif, petites interventions et dépannages, réparations et révisions, travaux divers, etc.) et gérés par une GMAO opérationnelle dans une organisation cohérente.

– L'estimation temporelle de tous les projets de travaux « lourds » à programmer pour la période concernée : arrêt d'unité, rénovation, campagne de mise en conformité, travaux neufs, grosses révisions. L'ajustement de ce cumul de charges prévues avec la capacité réelle interne du service offre une base solide d'organisation, en particulier pour décider de la part de charge à externaliser.

❑ Niveau 2 : le planning de charge prévisionnelle

Cet outil de gestion est tenu par l'agent d'ordonnancement et sert de tableau de bord au chef de service, lui donnant une bonne lisibilité des activités à moyen terme, de 3 à 6 mois.

□ Principe d'établissement

Le planning est basé sur l'équation, quantifiée sur la période d'ordonnancement choisie :

$$\textit{capacité de charge réelle} = \textit{charge programmée} + \textit{réserve de charge} + \textit{charge disponible programmable}$$

Nous en tirons la valeur de la charge disponible programmable suivant l'écriture vectorielle suivante facile à matérialiser sur un planning (figure 7.5) :

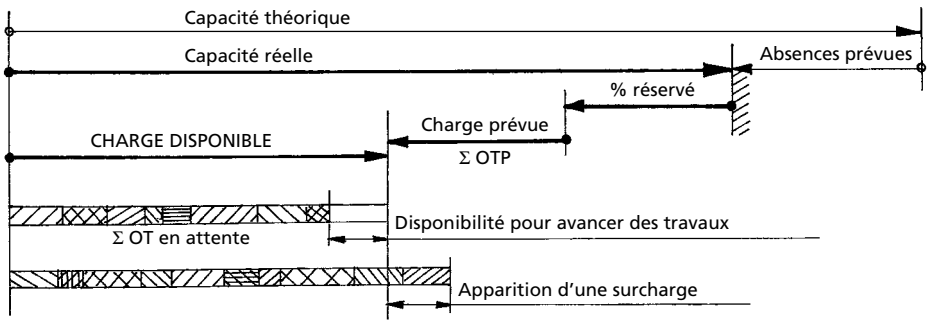


Figure 7.5 – Structure d'un planning de charge prévisionnelle (sur 4 mois, par exemple)

La charge disponible programmable est constituée d'un certain nombre d'OT relatifs à des travaux « en attente » non urgents mais de durée importante, qu'il serait nécessaire de débloquer au cours de la période Δt considérée.

□ Capacité de charge réelle

Elle est donnée par l'équation suivante :

capacité de charge réelle = capacité théorique – (heures non productives + aléas estimés)

La capacité théorique est l'horaire théorique de travail sur Δt. Les heures non productives sont constituées des heures de décharge, de nettoyage, de formation, etc. Elles sont connues à l'avance (plan de formation, règlement interne, etc.). Les aléas comprennent l'estimation statistique des absences (taux moyen d'absentéisme), des arrêts maladies, des jours de grèves, etc. Ils sont quantifiés en pourcentage de la capacité, à partir des résultats antérieurs, éventuellement en prenant en compte les variations saisonnières.

La charge prévue est constituée du cumul des OTP (préventif systématique) pendant Δt.

La charge réservée est estimée par la somme des pourcentages relatifs aux bons pour petits travaux (BTP), aux OT relatifs aux nombreux travaux correctifs urgents et de courte durée (OT U1 et 2) et aux aléas. Ces pourcentages de la capacité annuelle sont transformés en heures réservées pour la période considérée par simple règle de trois.

La charge disponible quantifie tous les travaux en attente qu'il va être possible d'intégrer dans la période d'ordonnancement, suivant leur délai et leur urgence relative.

□ Graphe de charge prévisionnelle cumulée

Il est possible de déduire de la même équation de principe un outil de gestion dont l'effet de cumul sur la période d'ordonnancement choisie donne une bonne vision de la charge disponible.

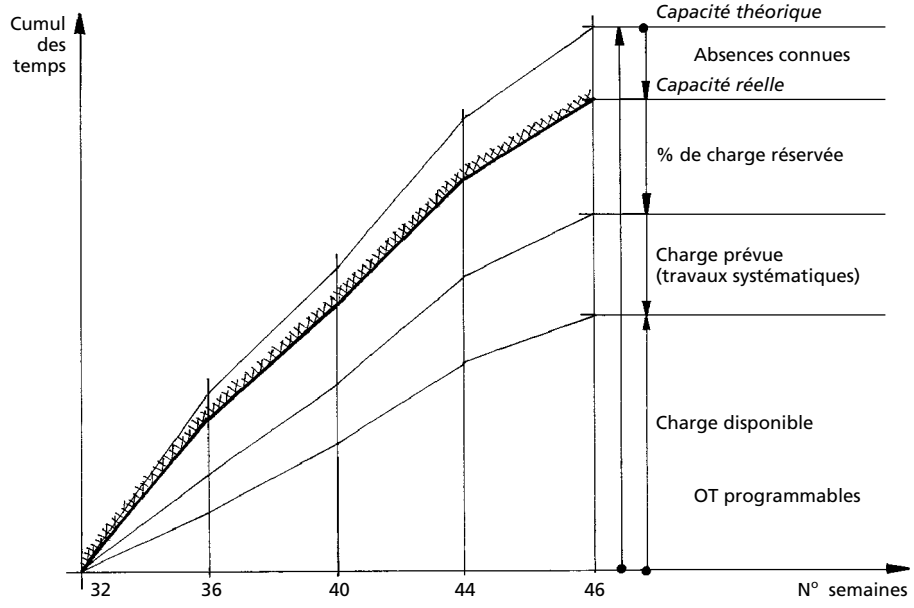


Figure 7.6 – Graphe de charge cumulée

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Exemple

La figure 7.6 donne le graphe de charge cumulée pour une équipe de 10 agents de maintenance sur la période semaine 32 à semaine 46.

❑ Niveau 3 : le planning de lancement

Géré par l'agent d'ordonnancement, ce planning a pour objet de distribuer une charge de travail hebdomadaire aux différentes équipes, antennes décentralisées ou ateliers de maintenance.

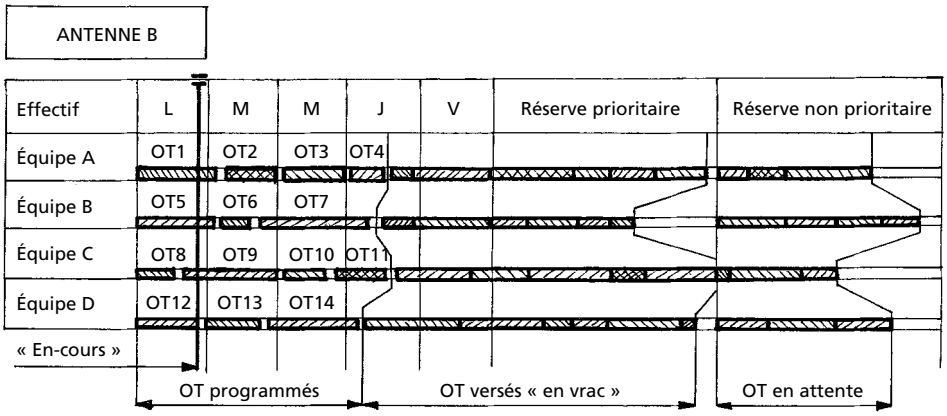


Figure 7.7 – Exemple de planning de lancement

Le planning de charge est ainsi « vidé » chaque semaine, les tâches plus détaillées étant transférées dans le planning de lancement, de façon planifiée pour les 2 à 3 jours à venir, « en vrac » pour les suivantes. En effet, il suffit d'un ajout dû à une urgence pour obliger à tout reconstruire, ce qui n'est pas trop gênant pour 2 journées. Les heures « préventives systématiques » sont débloquées chaque semaine pour la semaine suivante.

Le rôle de l'agent d'ordonnancement ne se limite pas à débloquer les tâches à exécuter, mais à les « lancer », c'est-à-dire à rendre disponible toute la logistique nécessaire.

❑ Niveau 4 : le planning d'atelier

Tenu par le chef d'équipe ou d'atelier, le planning d'atelier (figure 7.8) visualise l'affectation et la répartition du travail entre les techniciens. Les tâches « débloquées » par l'ordonnancement (niveau 3) doivent être « exécutables », c'est-à-dire associées à la logistique nécessaire à l'exécution. Le planning d'atelier couvre heure par heure, nominalement pour chaque technicien, les 2 à 3 prochains jours d'activité.

❑ Niveau 5 : le suivi de l'avancement

Le planning est une fonction « vivante » qui ne doit jamais être déconnectée des réalités du terrain. L'information de fin de tâche doit remonter à l'ordonnancement (planning de lancement) sous forme de BT (papier ou écran) complété par le

temps passé et l'heure de fin de tâche. Il appartient à l'agent d'ordonnancement d'aller sur le site pour les tâches « critiques » conditionnant un délai à respecter. L'analyse des écarts prévision/réalité est de sa responsabilité.

Remarque

Pour toutes les « unités d'ordonnancement » considérées précédemment (3 jours, 1 semaine, 3 mois, 1 an), ainsi que pour les plannings et pour les outils correspondants, la difficulté réside dans le fait que le « présent » change tout le temps ! Sans aller jusqu'à la gestion en « temps réel », il est nécessaire de mettre à jour, actualiser et corriger ces outils chaque jour pour les plannings d'atelier et de lancement, tous les mois pour le niveau 2, deux à trois fois par an pour le niveau 1.

L'utilisation d'outils informatique (GMAO ou logiciel de gestion de projet) facilite grandement le suivi de l'avancement des activités.

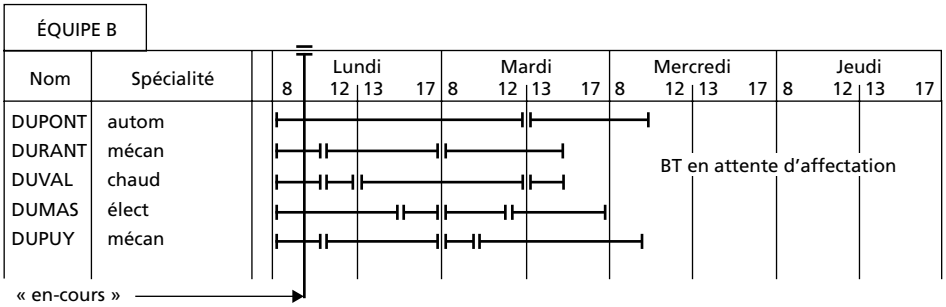


Figure 7.8 – Structure d'un graphe d'atelier

7.1.4 Les sous-fonctions de l'ordonnancement en maintenance : flux et procédures

La figure 7.9 met en évidence les flux de communication à travers les cinq sous-fonctions de l'ordonnancement.

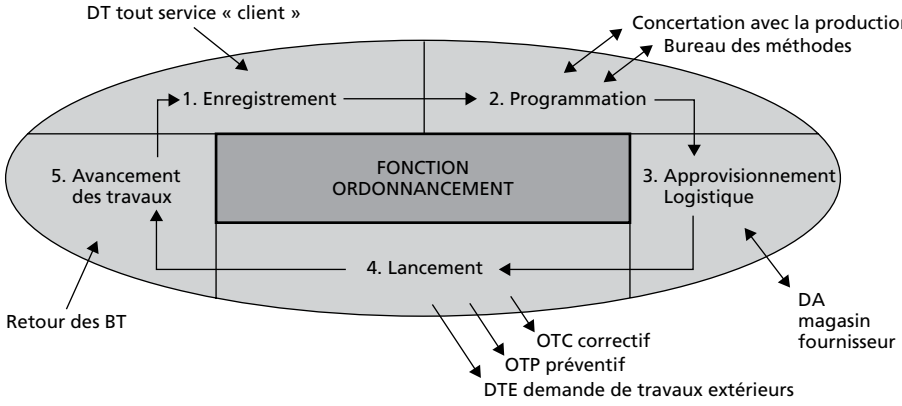


Figure 7.9 – Les flux de communication de l'ordonnancement

❑ **1. Enregistrement**

Toutes les demandes de travaux DT émanent des différents « clients » et convergent à l'enregistrement, à l'exception des BPT (bons de petits travaux), qui font

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

partie de la charge réservée et qui sont remis directement aux techniciens d'antennes de maintenance. Le tri se fait à partir des délais fixés, de la durée estimée d'intervention et de « l'urgence relative » éventuellement négociée, car chaque demandeur se pense prioritaire. Un arbitrage s'avère donc indispensable.

Les OT U_1 (intervention immédiate) et U_2 (dès que possible) sont transmis aux équipes concernées via les méthodes (la définition d'une procédure de sécurité prime l'urgence).

Les OT U_3 (prochain arrêt) et U_4 (prochain arrêt programmé) sont mis en attente de charge disponible.

❑ 2. Programmation

Il s'agit de gérer au niveau 2 le planning de charge prévisionnelle pour tous les OT U_3 et U_4, à regrouper lors d'un arrêt à programmer en concertation avec les secteurs de production. Ces tâches sont préparées au bureau des méthodes, qui définit les moyens nécessaires à leur exécution. La figure 7.5 illustre la programmation de la charge disponible.

❑ 3. Approvisionnement et logistique

Chaque préparation de tâche contient la liste des moyens nécessaires : il appartient à l'agent d'ordonnancement de vérifier leur présence en stock disponible, ou de les approvisionner (DA) en tenant compte des délais de livraison par rapport à la date programmée.

L'utilisation du module planification ou ordonnancement d'une GMAO doit signaler à l'opérateur toute incompatibilité entre une date planifiée et la disponibilité des ressources ou du matériel.

❑ 4. Lancement

Définissons le lancement comme « la mise à disposition des techniciens, en préliminaire à toute intervention, de TOUS les moyens logistiques rendus disponibles nécessaires à la réalisation de l'intervention ». La figure 7.10 illustre la mission et le rôle stratégique que le lancement doit tenir.

La sous-fonction lancement est la clé de l'amélioration de la performance du service maintenance. Toute analyse des « gaspillages de temps d'intervention » met en évidence les pertes dues à la recherche par les techniciens, pendant un arrêt machine, du schéma manquant, de l'outillage adapté, du testeur, du produit, de la référence de la pièce de rechange, puis de la pièce « qui ne va pas » et qu'il faut aller chercher chez le fournisseur.

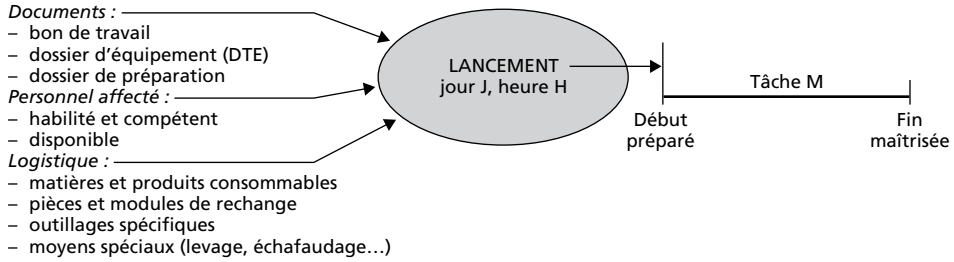


Figure 7.10 – Le lancement, clé de la productivité de la maintenance

La figure 6.6 illustre les scenarii « catastrophes » qui font le quotidien de certains services maintenance, faute de préparation et de lancement, et qui génèrent, outre les pertes de temps d'intervention, du stress, des risques d'accident, des coûts de défaillance excessifs et une mauvaise disponibilité des équipements.

❑ **5. Avancement des travaux**

Le suivi de l'avancement des travaux est le moteur de l'ordonnancement, chaque tâche achevée libérant la tâche suivante. Il se fait par l'exploitation de tous les retours de BT complétés par les techniciens et contrôlés par les chefs d'équipe, par écrits ou sur écran. Cette sous-fonction permet à l'ordonnancement de ne jamais se déconnecter des réalités du terrain.

7.1.5 Déclenchement des différents travaux de maintenance

❑ **Déclenchement des actions préventives**

☐ **Consignes permanentes**

Dans le cadre de la TPM, ces tâches de niveaux 1 et 2 sont destinées aux opérateurs et concernent des actions de nettoyage et de petites interventions (surveillance, réglages, petits dépannages, etc.) non enregistrés.

☐ **Rondes et fiches de route**

Ce sont aussi des consignes permanentes de « surveillance active » qui concernent les rondiers ou les agents chargés de relever des paramètres dans l'optique de la maintenance conditionnelle.

☐ **Maintenance systématique**

L'échéancier basé sur la méthode ABAC-ABAD établie par les méthodes est traduit en OTP par l'agent d'ordonnancement qui lance les actions préventives chaque semaine (déclenchement automatique à l'aide de la GMAO). Dans le cas où l'unité d'usage choisie est relative au fonctionnement, un relevé périodique de compteur permet une programmation au niveau 3 de l'I_{ps}.

☐ **Maintenance conditionnelle**

Subordonné à l'état constaté de l'équipement, le déclenchement se fait suivant un OTP sachant que le seuil d'alarme doit être positionné pour laisser un « délai d'ordonnancement ». La date d'intervention présente le caractère fortuit du correctif, mais il n'y a pas, dans ce cas, de DT émise de l'extérieur.

☐ **Révisions périodiques**

Le dossier de préparation des méthodes est décomposé en tâches formant un « projet » géré par une gamme d'ordonnancement (voir § 7.1.6). Un seul numéro d'OTP est attribué, un schéma d'enclenchement des phases permettant la programmation par l'ordonnancement.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Synthèse des procédures

En dehors de la GMAO, le modèle industriel fonctionnel le plus commun consiste en un carnet à trois volets DT, BT, OT, portant le même numéro d'identification (figure 7.11).

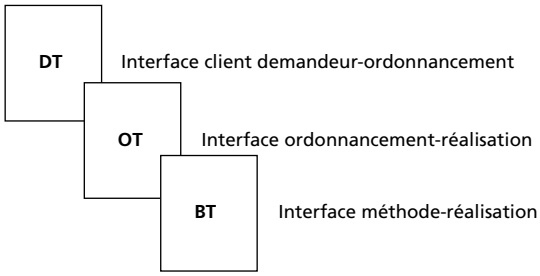


Figure 7.11 – Carnet à trois volets

Afin de simplifier l'ordonnancement, deux autres procédures sont utiles :
– en correctif, des BPT (bons pour petits travaux) ne transitant pas par l'ordonnancement, mais dont le bureau des méthodes garde la trace à fin d'analyse ;
– en préventif, les OTP (ordre de travail préventif).

La figure 7.12 propose la synthèse des procédures.

Remarques

D'autres procédures peuvent exister, adaptées à la typologie et à l'échelle du service maintenance. Citons :
– les procédures de sécurité, de consignation, de permis de feu, etc. ;
– les DTE (demandes de travaux extérieurs) ;
– les FIT (fiche d'intervention technique), destinées à l'atelier central ;
– les DA (demande d'approvisionnement) et BSM (bons de sortie magasin).
Rappelons l'objectif général : obtenir une traçabilité complète des activités du terrain pour un poids administratif minimal.

7.1.6 Gamme d'ordonnancement

Afin de simplifier l'ordonnancement, lorsqu'une opération homogène, de type révision d'un équipement par exemple, est décomposable en phases, le bureau des méthodes réalise une « gamme d'ordonnancement ». L'ordonnancement enregistrera le dossier d'OT sous un seul numéro d'OT. Le dossier d'OT comprendra :
– le graphe d'enclenchement des phases et les temps prévus pour chaque phase ;
– les bons de phases, descriptifs du travail à réaliser.

❑ Schéma d'enclenchement des phases

Lorsqu'il existe, une *contrainte d'antériorité* du type 20 ne peut commencer que si 10 est achevée, les tâches sont mises en série. Nous dirons que 10 libère 20, ou 20 libère 30 et 40 (figure 7.13). La succession des phases en série détermine le « chemin critique » de la gamme d'ordonnancement, qui sera gérée comme un miniprojet.

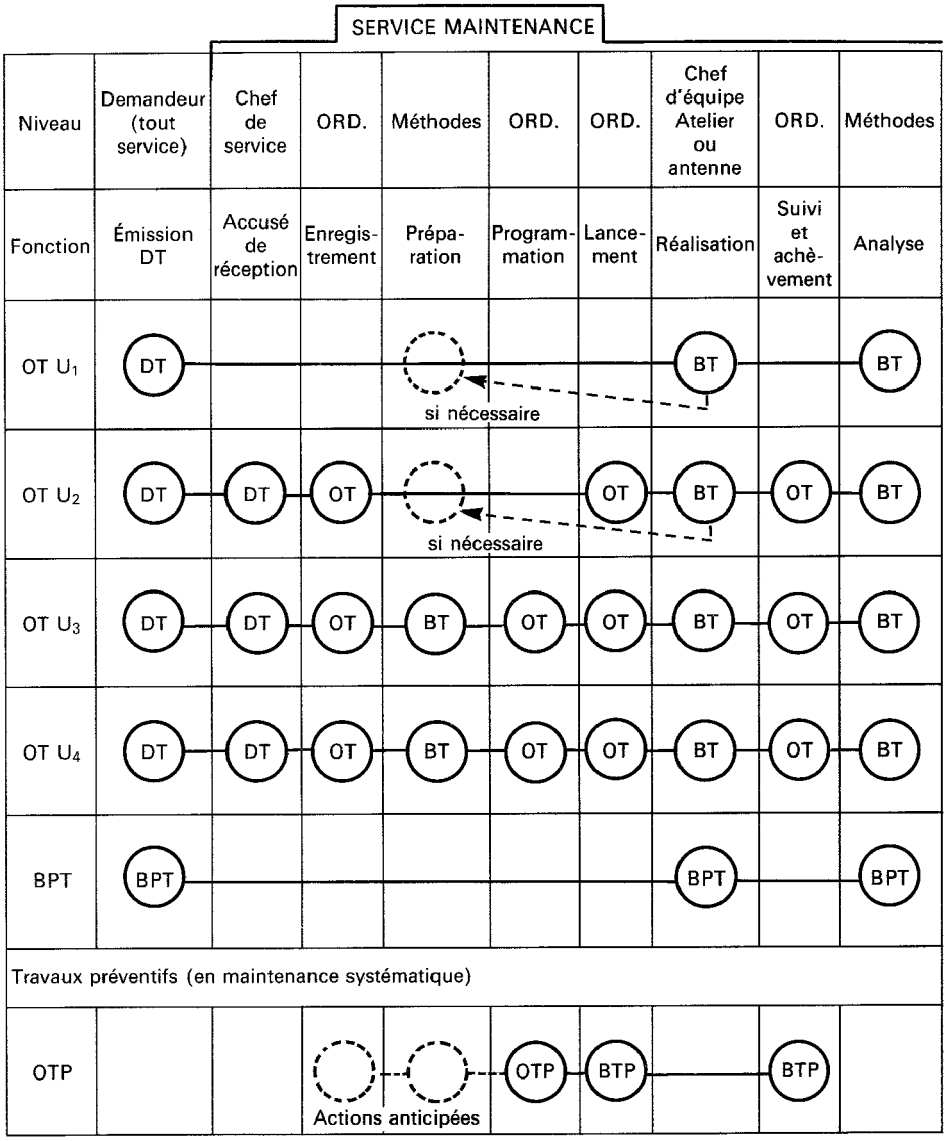


Figure 7.12 – Synthèse des procédures

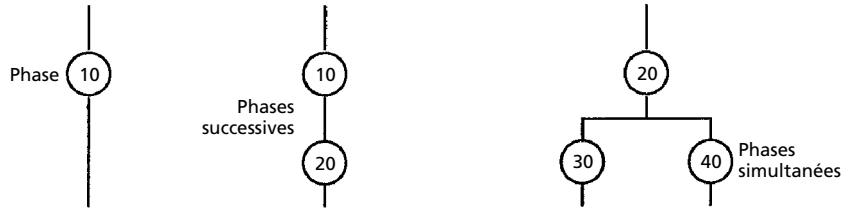


Figure 7.13 – Enclenchement des phases

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Application : révision annuelle d'un groupe motopompe

Prenons comme application la gamme-type d'ordonnancement relative à la révision d'un groupe motopompe centrifuge (tableau 7.2). La gamme est structurée à partir du schéma d'enclenchement des 10 phases. Les temps alloués ont été déterminés par les méthodes. Les valeurs des colonnes « temps passés » ont été reportées à partir des BT aux fins d'analyse des écarts.

Tableau 7.2 – Exemple de gamme d'ordonnancement

GAMME D'ORDONNANCEMENT		Révision annuelle groupe motopompe xxxxxx				OT N° 2674/99			
Schéma d'enclenchement N° phases	Phases	Temps alloués				Temps passés			
		phase	électricité	mécanique	à valoriser	à valoriser	électricité	mécanique	phase
10	Dépose du groupe	**5**	1 h	5 h	6 h	5 h 30	1 h 30	4 h	4 h
20	Démontage pompe	**5**		5 h	5 h	6 h		6 h	6 h
30	Expertise	**2**	1 h		1 h	0 h 30	0 h 30		0 h 30
40	Connexions moteur	**1**	1 h		1 h	0 h 30	0 h 30		0 h 30
50	Démontage moteur	**3**		3 h	3 h	2 h 30		2 h 30	2 h 30
60	Échange garniture pompe	2		2 h	2 h	2 h 30		2 h 30	2 h 30
70	Visite roulements moteur	**4**		4 h	4 h	3 h 30		3 h 30	3 h 30
80	Remontage moteur	**4**		4 h	4 h	5 h 30		5 h 30	5 h 30
90	Remontage pompe	6		6 h	6 h	7 h		7 h	7 h
100	Essai du groupe	**5**	2 h	5 h	7 h	7 h 30	2 h 30	5 h	5 h
En gras, chemin critique		37 h	5 h	36 h	41 h	43 h 30	5 h 30	37 h 30	39 h 30
Date début révision :		29 h	Prévu ⟵ chemin critique ⟶ passé						30 h
Date fin révision									

7.2 L'ordonnancement des projets : l'outil PERT

7.2.1 La théorie des graphes et les différentes méthodes

❑ Situation du problème en maintenance

La maintenance doit parfois mettre en œuvre un certain nombre de « travaux lourds » caractérisés par le nombre et la durée des opérations constitutives.

Les arrêts annuels d'unités, certaines révisions générales pluriannuelles, les projets de rénovation et de travaux neufs mobilisent plusieurs équipes et entreprises extérieures sur des périodes allant d'une semaine à plusieurs mois. Se superposant aux activités habituelles, ces travaux doivent être pilotés en ordonnancement avec des méthodes spécifiques déduites de la théorie des graphes. En effet, les graphes de Gantt atteignent leurs limites au-delà de $N > 50$ tâches. Ayant l'avantage d'être très visuels, ils seront malgré tout édités en « sous-programmes » du PERT général, que l'on trouve dans les nombreux *logiciels de gestion de projets* du commerce.

❑ Différentes méthodes d'ordonnancement de projets

☐ Théorie des graphes

Partie intégrante de la recherche opérationnelle, la planification par réseaux comprend plusieurs méthodes d'application, toutes variantes du PERT (*planning evaluation and review technic*), développé aux États-Unis vers 1950 et appliqué avec succès en 1958 pour le programme spatial Polaris. Tous ces outils se prêtent à une gestion informatique aisée à partir de logiciels de gestion de l'ordonnancement des projets.

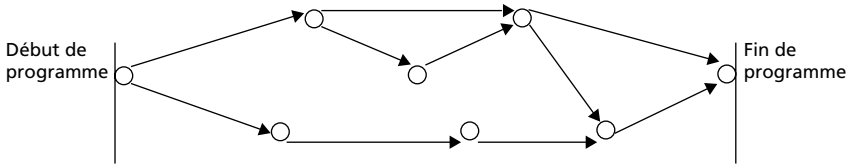


Figure 7.14 – Exemple de réseau

La figure 7.14 montre la structure d'un réseau. Il est constitué de flèches, arcs ou chemins et de nœuds ou sommets, dont la signification est conventionnelle.

☐ L'outil PERT et ses variantes

Par convention, pour le PERT :

– la flèche représente une tâche. Contrairement au Gantt, la longueur d'arc ne représente pas la durée de la tâche ;

– le nœud représente une étape, liaison logique entre la fin d'une tâche et le début de la suivante, caractérisée par l'antériorité.

De nombreuses variantes du PERT existent. Citons :

– CPM (*critical path méthod*) ou méthode du chemin critique, pour lequel la durée aléatoire des tâches n'est pas prise en compte ;

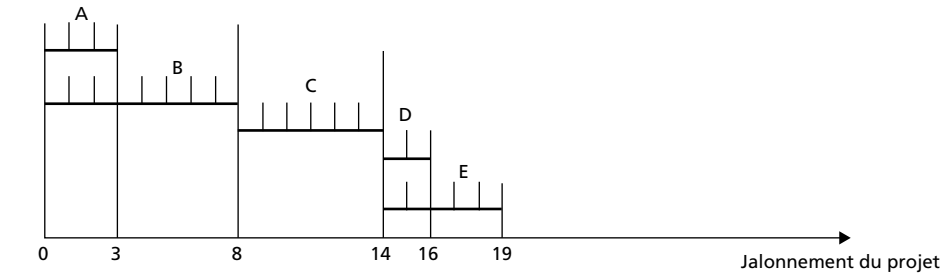
– PERT-COST, qui associe une tâche à des ressources et à des coûts ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

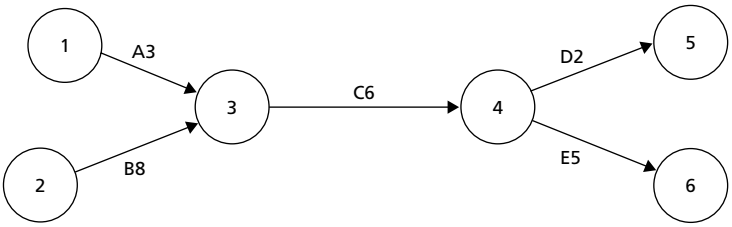
– MPM ou « méthode des potentiels », développée en France. Cette méthode inverse les conventions du PERT : les arcs sont les étapes, les nœuds représentent les tâches.

☐ **Symbolisation conventionnelle des tâches et des étapes**

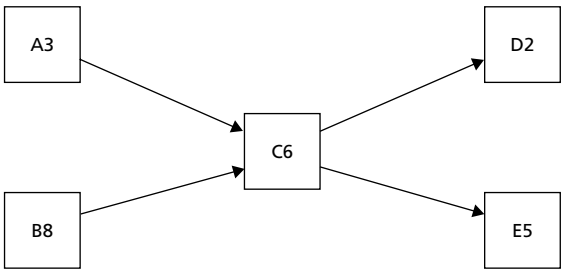
Prenons l'exemple de cinq tâches traitées successivement par les conventions de Gantt, PERT et MPM (figure 7.15).



[a]



[b]



[c]

Figure 7.15 – Conventions de représentation des trois méthodes : (a) Gantt; (b) PERT; (c) MPM

La méthode Gantt est la plus « visuelle », mais elle devient trop lourde au-delà de 50 tâches à ordonnancer. Les méthodes PERT et MPM sont plus absconses, mais ne sont pas limitées en nombre de tâches. Nous avons choisi d'analyser le PERT, car il est supporté par de nombreux logiciels spécifiques de gestion de projets.

7.2.2 Description du PERT

❑ **Le projet (ou programme)**

Le projet doit être « délimité », c'est-à-dire constitué et découpé en N tâches bien identifiées. Les contraintes internes et externes (délai en particulier) doivent être prises en compte lors de l'analyse initiale.

Le problème à résoudre est double : d'abord établir le projet initial, puis le démarrer et le gérer, sachant que la réalité des événements (retards et avances sur tâches) viendra inévitablement contrarier la prévision initiale.

□ **Établissement du projet initial**

L'établissement du réseau PERT initial va permettre de déterminer :

– l'enchaînement chronologique des tâches et leur calendrier d'exécution ;

– le chemin critique et le délai final associé à une probabilité.

Si l'on affecte des ressources à chaque tâche, le réseau permet aussi de connaître la variation de charge le long du jalonnement et de l'optimiser par lissage.

□ **Gestion de l'en-cours du projet**

La date de démarrage étant déterminée, des écarts vont survenir entre le réseau initial et les réalités du terrain : par exemple, un retard sur une tâche margée non critique peut amener à un changement de chemin critique, donc de délai. Les logiciels spécifiques permettent facilement d'effectuer ces corrections.

❑ **La fiche de tâche**

□ **Analyse initiale de chaque tâche**

Pour chaque tâche, il suffit d'analyser ou de définir :

– sa désignation et son repère ;

– ses contraintes d'antériorité « directes », sachant que la loi d'antériorité est transitive. Donc, si C suit B et si B suit A, C suivra A sans qu'il soit nécessaire de le préciser ;

– sa durée moyenne et, éventuellement, son écart-type qui sont donnés par les formules étudiées au paragraphe 6.2.2 que nous rappelons :

$$T_{moy} = \frac{T_{opt} + 4T_{réal} + T_{pess}}{6}$$

$$\sigma = \frac{T_{pess} - T_{opt}}{6}$$

– les ressources associées à la tâche (effectif, par exemple) éventuellement.

□ **Fiche de tâche : modèle possible**

Tous les logiciels de gestion de projet proposent un écran d'enregistrement des tâches. En cas de traitement manuel, nous proposons la fiche suivante (tableau 7.3), remplie en trois étapes :

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

1. l'analyse initiale de la tâche (en gras), comportant les antécédents et les prévisions de durée ;
2. les données après tracé du réseau (en italique), remplie automatiquement par le logiciel ;
3. l'enregistrement à la fin de la tâche.

Tableau 7.3 – Fiche de gestion de tâche

Référence projet :	**Désignation de la tâche**
Repères tâche(s) antécédentes :	**Durée prévue T_m =** **Écart-type σ =**
Repère étape début : *Repère étape fin :* *Critique : O/N*	*Date prévue début :* *Date prévue fin :*
Description de la tâche	Date réelle début : Date réelle fin : Durée réelle T = Écart/prévision = Cause de l'écart :

❑ Conventions de représentation du PERT

□ La tâche et ses étapes

La tâche est repérée par un arc (une flèche, le plus souvent) et la valeur de sa durée prévue. L'étape ne consomme ni temps, ni ressource. C'est simplement un jalon représenté par un cercle numéroté et donnant les dates au plus tôt et au plus tard de l'étape (figure 7.16).

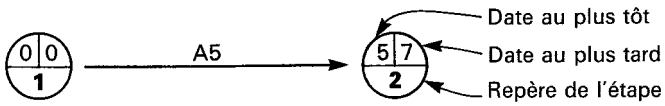


Figure 7.16 – Définition complète d'une tâche

□ Les contraintes d'antériorité

Des contraintes de dépendance unissent les tâches, suivant les règles simples décrites à la figure 7.17 ci-contre.

La tâche fictive E est de durée nulle : elle permet de ne pas ajouter une contrainte (D suit A) qui n'existe pas, donc de gagner un degré de liberté par rapport au cas 4. Les étapes limitant E ont donc les mêmes dates.

❑ Recherche du réseau

Dans le cas de l'utilisation d'un logiciel de type PERT, une fois chaque fiche de tâche saisie, l'architecture du réseau est affichée immédiatement, ainsi que sa datation relative, ou absolue si l'on entre la date et l'heure de début, ainsi que le calendrier (jours travaillés ou non).

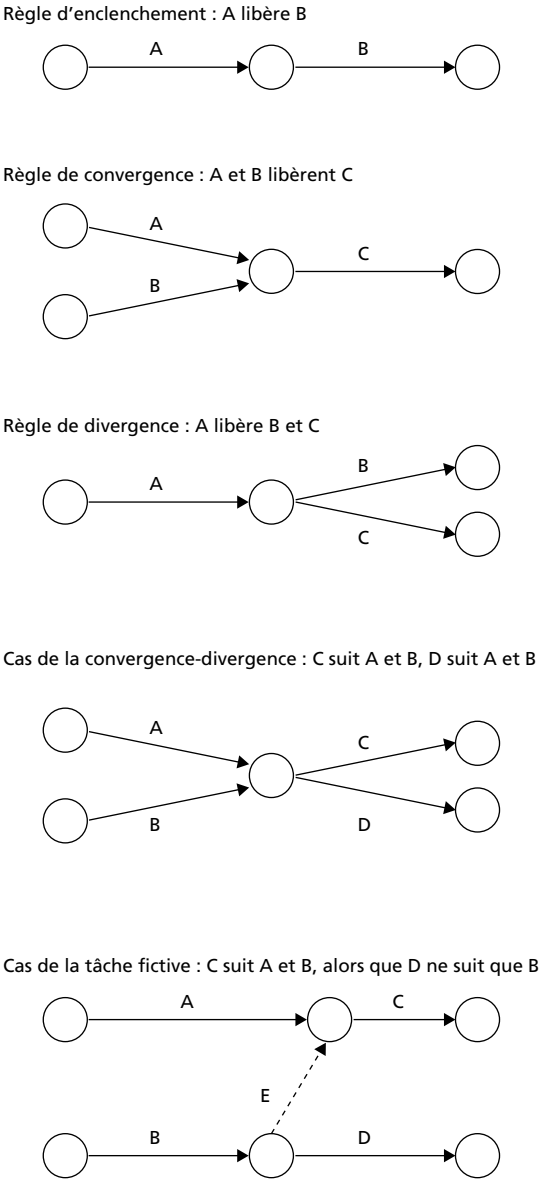


Figure 7.17 – Les conventions PERT de tracé de réseau

Dans le cas d'un traitement « manuel », la construction du réseau se fait en trois phases.

1. La recherche de la géométrie à partir des contraintes d'antériorité, en application des règles précédentes, si nécessaire à partir d'une matrice d'enclenchement des tâches.
2. La recherche du chemin critique, et du délai final.
3. La caractérisation de toutes les étapes (dates au plus tôt, au plus tard et marges).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Afin d'illustrer les trois phases de la construction d'un réseau PERT, nous allons traiter complètement un « mini-cas » de seulement 7 tâches, définies par la figure 7.18.

□ Matrice d'enclenchement des tâches

Elle recense toutes les antériorités, en les portant dans une matrice carrée (figure 7.18).

Tâche	Tâche antécédentes	Durée
A		3 h
B	A	6 h
C	B	2 h
D	A	5 h
E	G F	2 h
F	C D	10 h
G	B	3 h

	A	B	C	D	E	F	G
A							
B	×						
C		×					
D	×						
E						×	×
F			×	×			
G		×					

ce qui se lit : B libère C et G (divergence)

ce qui se lit : F et G libèrent E (convergence)

Figure 7.18 – Étude de cas et matrice correspondante

□ Tracé du réseau

Le dépouillement de la matrice précédente permet de tracer le réseau suivant, les étapes étant numérotées de 1 à 6 (figure 7.19).

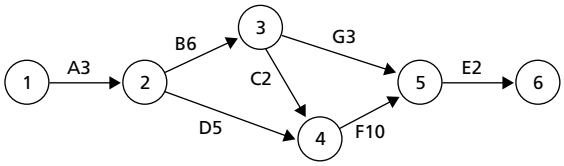


Figure 7.19 – Étude de cas : architecture du réseau PERT

□ Obtention du réseau complet

Principe de la recherche (figure 7.20)

À partir du chemin critique dont aucune tâche n'est margée, on trouve la date de fin (délai) de la tâche *N*.

À partir de la date de début 1, on complète progressivement de gauche à droite les dates au plus tôt.

À partir de la date de fin *N*, on complète progressivement de droite à gauche les dates au plus tard.

La différence entre les deux dates donne la « marge totale » de chaque tâche.

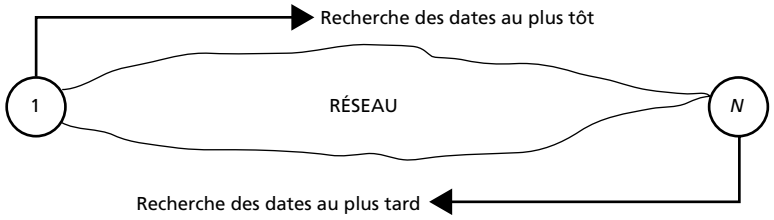


Figure 7.20 – Principe de recherche des dates et des marges

Application au cas

La figure 7.21 donne le tracé complet du réseau cherché.

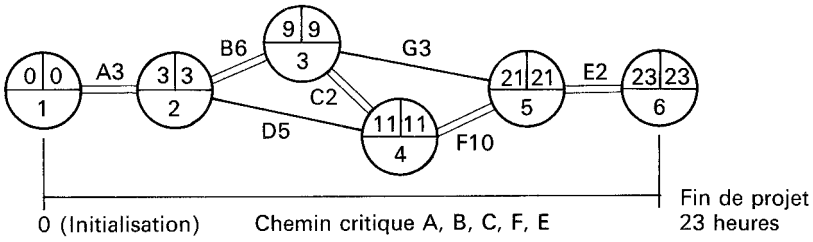


Figure 7.21 – Réseau PERT complet

□ Calendrier d'exécution

Le tableau 7.4 recense toutes les informations déduites du réseau PERT. Le calendrier d'exécution s'obtient en traduisant les dates « relatives » du tableau en dates « calendrier », ce qu'un logiciel donne facilement à partir de la seule date de début de projet.

Les marges expriment la flexibilité de l'ordonnancement, c'est-à-dire le degré de liberté offert au programmateur pour planifier le début de la tâche margée. La plus utilisée est la marge totale, définie ainsi :

marge totale = début au plus tard – début au plus tôt

Il existe également une « marge libre » définie par :

marge libre = début au plus tôt de la tâche suivante – fin au plus tôt de la tâche concernée

Tableau 7.4 – Étude de cas : tableau complet d'ordonnancement

Étape		Tâche	Durée	Plus tôt		Plus tard		Marge		Chemin critique
Début	Fin			Début	Fin	Début	Fin	Libre	Totale	
1	2	A	3	0	3	0	3	0	0	X
2	3	B	6	3	9	3	9	0	0	X
3	4	C	2	9	11	9	11	0	0	X
2	4	D	5	3	11	6	11	3	3	
5	6	E	2	21	23	21	23	0	0	X
4	5	F	10	11	21	11	21	0	0	X
3	5	G	3	9	21	18	21	9	9	

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

7.2.3 Exploitation d'un réseau PERT

❑ **Lissage de la charge**

En jouant sur les marges et à partir des effectifs ou des heures (charge) affectés à chaque tâche, il est possible d'effectuer un lissage en fonction de deux contraintes possibles :

– limitation de l'effectif présent sur un site confiné, à un moment donné, ou limitation par capacité de charge imposée. Dans ce cas, un dépassement de délai peut être la seule solution (figure 7.22 a) ;

– réduction du délai final. Dans ce cas, le lissage peut amener à une surcharge (figure 7.22 b).

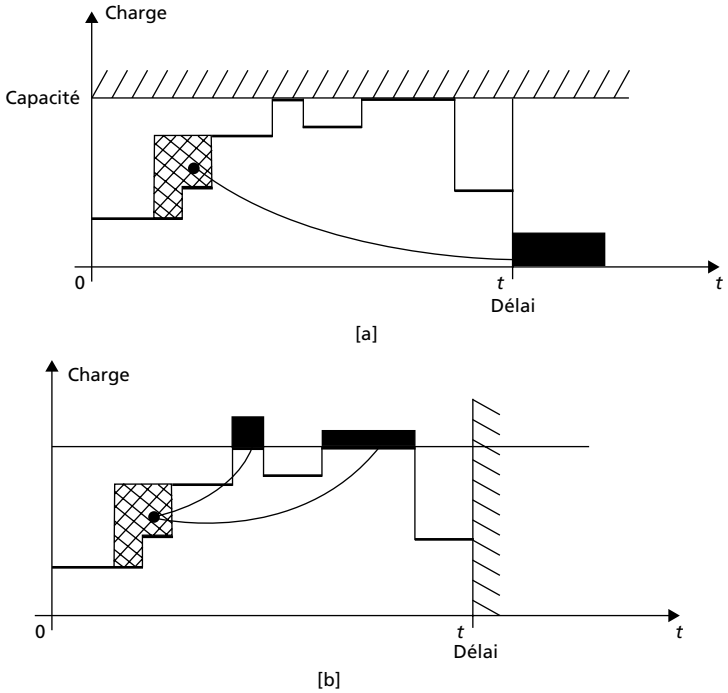


Figure 7.22 – Lissage à partir de contraintes de charge ou de délai.
a. Capacité de charge imposée. b. Délai imposé

❑ **Probabilité de tenir le délai d'un projet**

□ **Estimation de la durée d'une tâche**

Nous avons déjà vu que l'espérance mathématique de la durée d'une tâche peut être estimée par la formule :

$$T_m = \frac{T_o + 4T_r + T_p}{6}$$

$$\sigma = \frac{T_p - T_o}{6}$$

Si nous prenons l'exemple de la tâche D_5 du cas traité, les estimations $T_o = 3$ h, $T_r = 4$ h et $T_p = 11$ h donnent $T_m = 5$ h et $\sigma = 1{,}33$ h.

□ **Estimation de la durée d'un projet**

La durée d'un projet est mise en évidence par la durée du chemin critique, formé de tâches « en série » non margées.

La distribution de la date de fin de projet est une loi normale, d'autant plus idéalement que le nombre N de tâches est grand. La durée moyenne du projet est donc la somme des durées moyennes, soit $T_m = \Sigma\ T_{mi}$. La variance du projet est la somme des variances de chaque tâche, soit $V = \Sigma\ V_i$.

Si nous reprenons notre cas, en supposant que la variance totale des sept tâches soit de 9 h, nous trouvons :

$$T_m = 23 \text{ h et } \sigma = 3 \text{ h}$$

□ **Comment fixer un délai de projet associé à une probabilité**

Puisque la loi de distribution de la fin de projet est normale, la probabilité de tenir le délai T_m n'est que de 0,5. Ce qui n'est pas admissible pour un délai contractuel, surtout s'il est assorti de pénalités de retard ou de contraintes économiques lourdes. En général, nous associerons au délai une probabilité de 0,90.

L'usage de la table des valeurs de la fonction de répartition de la loi normale réduite permet d'associer à tout délai sa probabilité, ou à une probabilité donnée le délai correspondant. Pour notre cas, la table donne $U = 1{,}28$ pour une probabilité de 0,90 :

$$U = \frac{X - m}{\sigma}$$

$$X = m + U;\ \sigma = 23 + 1{,}28 \times 3 = 26{,}8 \text{ heures}$$

Nous négocierons donc le délai de 27 heures, sachant que nous avons 90 chances sur 100 de le tenir, alors que la durée moyenne était de 23 heures.

7.3 La logistique de maintenance : la gestion des pièces de rechange

7.3.1 Logistique de soutien à la maintenance

❑ **La fonction achat-approvisionnement**

Cette fonction commerciale de l'entreprise est un partenaire privilégié de la maintenance, grand consommateur de matières, fournitures, rechanges, etc. La maintenance a la responsabilité de la gestion de son ou de ses magasins propres, centralisés ou décentralisés. À ce titre, le besoin d'approvisionnement des stocks de maintenance implique un regard sur la fonction achat, afin de dégager les principes du nécessaire partenariat. Pour ce faire, reprenons le tableau proposé par Luc Boyer (BOY 81).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Tableau 7.5 – Les phases du processus d'achat

Phases du processus d'achat	Utilisateurs	Prescripteurs	Conseillers	Acheteurs	Décideurs	Filtres
Reconnaissance d'un besoin	X		X			
Détermination des spécificités	X	X	X			
Recherche de fournisseurs potentiels			X	X		X
Évaluation des propositions	X	X	X	X	X	
Choix du fournisseur			X	X	X	
Évaluation des performances	X			X		

Les techniciens de maintenance sont utilisateurs et les agents de méthodes-ordonnancement sont prescripteurs des articles à acheter. Ce tableau met donc très clairement en évidence les règles du partenariat.

À partir du besoin d'approvisionnement, le rôle de la maintenance se limite à établir les spécifications, à participer à l'évaluation des propositions, puis des performances. D'où un rôle à dominante technique, mais la maintenance a en plus la responsabilité de la gestion de ses stocks.

❑ Constitution du soutien logistique en maintenance

Par soutien logistique à la maintenance, il faut entendre l'ensemble des moyens permettant aux techniciens de maintenance d'être efficace dans leurs actions. Nous avons déjà listé ces moyens à propos du lancement (figure 7.11). Parmi ces moyens, nous allons identifier les consommables qui doivent être approvisionnés, stockés et utilisés à la demande. Citons :

– des produits techniques et des consommables d'atelier tels que « quincaillerie » (visserie), petite mécanique (joints, roulements, etc.), produits de nettoyage (solvants…), baguettes de soudure, etc. ;

– des matières premières (tubes, tôles, barres, etc.) pour réfection de pièces et pour fabrications diverses ;

– des lubrifiants préalablement standardisés ;

– des pièces et des modules de rechange attachés à un équipement ou standard. Il appartient aux « méthodes » de déterminer la nomenclature des pièces d'usure relative à chaque équipement.

L'ensemble de ces articles constitue « le fichier des rechanges » du stock de maintenance.

□ Application de la méthode ABC

En application de la méthode ABC d'analyse des stocks, nous pourrons ainsi distinguer deux familles extrêmes :

– famille A, un petit nombre de pièces de rechange coûteuses représentant, par exemple 12 % du nombre d'articles en magasin, mais 52 % de la valeur consommée ;

– famille C, un grand nombre de petits consommables de faible valeur propre. Par exemple 61 % du nombre d'articles, mais seulement 17 % de la consommation annuelle.

□ Famille A : un petit nombre de pièces de rechange coûteuses

La gestion de la famille « les pièces et modules de rechange » est très spécifique de la fonction maintenance, et sa problématique est celle du préventif. En effet, choisir de stocker une pièce de rechange est une action préventive qui a un coût direct. Choisir de ne pas la stocker est une prise de risque qui a un coût potentiel « de défaillance ».

Faut-il en stocker 0, ou 1, ou 2, ou 3 ? En maintenance, *le passage de la pléthore à la pénurie* est très rapide, et ne passe pas inaperçu ! Bien sûr, le taux de défaillance λ en panne/unité d'usage est facile à déterminer. Mais, si la prévision d'un grand nombre d'événements est facile et significative, la prévision d'un nombre très réduit d'événements (défaillances) est moins sûre.

Entre le 0 stock et le stock « dormant ou mort », la solution est peut-être intermédiaire : tenir le stock chez le fournisseur, à condition d'être certain d'une réactivité compatible avec les coûts d'indisponibilité. Remarquons que la volonté de réduire ces stocks, économiquement légitime, s'oppose aux gaspillages de temps lors d'interventions, faute de moyens immédiatement disponibles. La balance économique tient alors dans les surcoûts de défaillance opposés aux gains obtenus par réduction des stocks.

C'est ce problème A, spécifique de la maintenance que nous allons développer par l'analyse du modèle de Poisson.

□ Famille C : un grand nombre de petits articles

À cette famille correspond une gestion de stock « classique » réalisée à partir de l'estimation de la consommation, la détermination du stock minimal, la méthode adaptée de réapprovisionnement et la quantité économique à approvisionner.

Nous renvoyons le lecteur aux ouvrages spécialisés en gestion de stocks : contrairement aux stocks de rechanges précédents, les stocks de magasin de maintenance n'ont rien de spécifique.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

7.3.2 Éléments de gestion des stocks

La gestion des stocks se fait évidemment à l'aide de logiciels de suivi et de gestion soit spécifiques, soit intégrés à une GMAO (cas souhaitable). Ce qui ne dispense pas de connaître et de réfléchir à l'application des méthodes de gestion des stocks.

❑ Mécanismes de régulation

La régulation d'un niveau de stock d'un article donné se fait par le flux entrant, en rétroaction (ou *feedback*) des sorties qui caractérisent la *loi de consommation*.

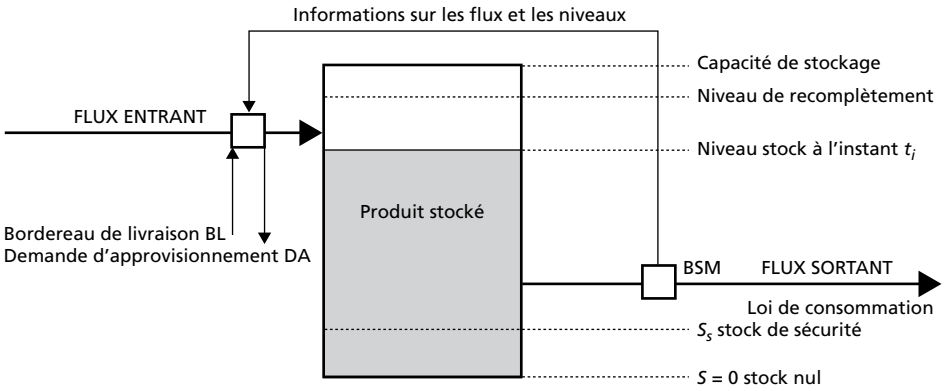


Figure 7.23 – Gestion et régulation d'un stock relatif à un produit

L'équation fondamentale d'un stock donné, à un instant t_i, est donnée par l'expression :

$$N_i(\text{stock à } t_i) = N_0(\text{stock à } t_0) + \sum_{t_0}^{t_i} Q_e(\text{entrées}) - \sum_{t_0}^{t_i} Q_s(\text{sorties})$$

☐ Le stock à t_0

Le stock à t_0 est connu par un inventaire annuel, réalisé par le magasinier dans le cadre de la valorisation des stocks requise par l'établissement du bilan annuel. L'application de cette formule suffirait théoriquement à connaître le niveau de stock à tout instant si les saisies étaient parfaites. Ce qui n'est pas le cas par erreurs, lacunes, piratage ou manque de rigueur. Des inventaires périodiques de recalage sont donc nécessaires, en particulier au moment des réapprovisionnements.

☐ Les entrées-sorties

Par analogie hydraulique, les entrées et les sorties sont caractérisées par des débits (en quantités/unités de temps) dont la vanne de régulation serait à l'entrée de la capacité. Là ou un détecteur de niveau minimal ouvrirait la vanne de remplissage, un stock de réserve $S_s + S_c$ déclenche le réapprovisionnement, S_c étant le stock de couverture correspondant au délai de réapprovisionnement.

Nous dirons donc que la gestion d'un stock consiste à prévoir la consommation entre deux opérations de régulation. Ce qui s'appuie sur une exploitation statistique des informations « historiques » et si possible, sur une loi probabiliste de consommation, dont la variable sera dans ce cas « discrète ».

❑ Représentation graphique des variations d'un stock

Le graphe d'évolution d'un stock de la figure 7.24 est descriptif des variations d'un stock au fil du temps. Cet outil graphique simple se prête bien à des calculs analytiques de prévision à partir des lois de consommation.

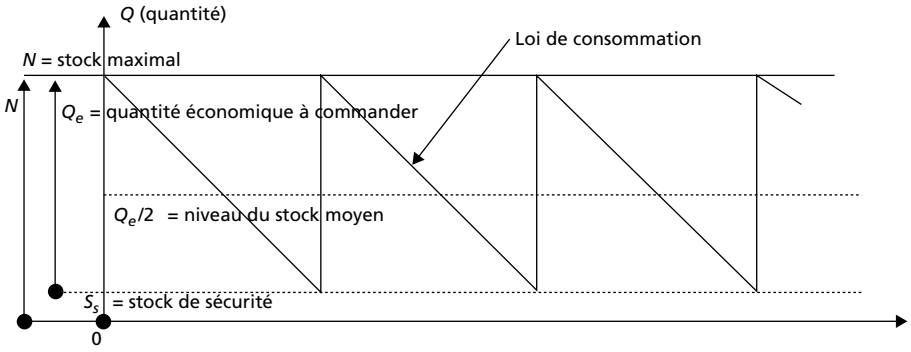


Figure 7.24 – Graphe d'évolution théorique d'un stock

Le graphe illustre la succession des réapprovisionnements, paramétrés par les quantités économiques Q_e, des sorties caractérisant la loi de consommation et des passations de commande, déclenchées par le stock de couverture S_c et conditionnées par le stock de sécurité S_s.

❑ Stratégies de réapprovisionnement

Pour réapprovisionner un stock donné, les deux problèmes à résoudre sont :

– à quelle date faut-il commander ?

– combien d'articles faut-il commander ?

D'où les quatre méthodes possibles, à choisir en fonction des caractéristiques des articles.

Tableau 7.6 – Les quatre méthodes de réapprovisionnement

Date	Quantité	
	Fixe	Variable
Fixe	1	2
Variable	3	4

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Les méthodes 1, 2 et 3 n'ont rien de spécifiques à la maintenance, hormis la nature technique des composants consommés : nous renvoyons le lecteur aux nombreux ouvrages de gestion des stocks, dont PIM 98, de la même collection… La méthode 4 spécifique des pièces de rechange sera développée au paragraphe 7.3.3.

□ **Méthode 1 : programme de réapprovisionnement**

Cette méthode est applicable aux articles de faibles valeurs (catégorie C) et de consommation régulière, parfois mis en libre service. Exemple : boulonnerie standard. La quantité à commander peut être à l'origine déterminée par un calcul de quantité économique.

□ **Méthode 2 : gestion par calendrier**

Nommée également « recomplètement », cette méthode est adaptée à des pièces peu coûteuses dont la demande est stable ; elle est facile à gérer à partir d'un calcul de « quantité économique » Q_e obtenue par la formule de Wilson. Cette méthode permet le groupage des commandes et des transports en optimisant la durée entre deux commandes. Elle est adaptée aux consommations régulières.

La formule de Wilson est obtenue par optimisation du coût total du stockage d'un article, avec pour hypothèses une consommation régulière et un coût unitaire C_u indépendant de la quantité commandée. On démontre alors que la quantité d'articles à commander Q_e est donnée par la formule :

$$Q_e = \sqrt{\frac{2KC_a}{iC_u}}$$

avec :

K : consommation annuelle prévue ;

C_a : coût de passation de commande (frais administratifs, informatiques…) ;

C_u : coût unitaire de l'article ;

i : taux de possession (intérêt du capital immobilisé, frais de stockage, locaux, assurances, impôts,…). Il est souvent évalué à 15 % ou 20 % du coût de référence.

La durée optimale entre deux commandes est donnée par T_o :

$$T_o \text{ (en jours)} = Q_e/K \cdot 365 \text{ ou } T_o \text{ (en mois)} = Q_e/K \cdot 12$$

Exemple

Soit un article d'une valeur unitaire de 3 € dont la consommation annuelle est $K = 600$. Le coût de passation d'une commande est évalué à 15 €, le taux de possession à 15 %. L'application de la formule de Wilson nous amène à commander $Q_e = 200$ articles, soit une commande tous les $T_o = 4$ mois.

□ **Méthode 3 : gestion par point de commande**

Applicable aux articles de la catégorie A à demande fluctuante, elle implique un suivi régulier de l'état des stocks. Il faut calculer le niveau de réapprovisionnement en fonction du délai de livraison et de la quantité moyenne consommée. L'atteinte de ce niveau prédéfini ($S_s + S_c$) déclenche le « point de commande ».

☐ Méthode 4 : le modèle poissonien

Adaptée à la catégorie A des pièces coûteuses à prix variables consommées à partir de « casse » imprévisible, elle couvre le cas des pièces rechange. Les commandes seront passées au mieux des conditions du marché.

En fait, les techniques développées en gestion des stocks permettent d'optimiser individuellement chaque article. Ce qui amène à des décisions peu compatibles avec l'existence souhaitable d'un « *plan directeur des stocks* » présentant classiquement des objectifs de réduction des valeurs stockées. À cette fin, des examens périodiques de stocks permettront de jouer à la fois sur le qualitatif (quel article sortir du stock ?) et le quantitatif (optimisation des paramètres de gestion).

❑ Le stock de sécurité S_s

À partir du déclenchement de la commande, deux facteurs influencent la prévision :

– l'incertitude sur les consommations ;

– l'incertitude sur le délai de mise à disposition, contenant entre autres des délais administratifs (passation de la commande) et le délai de livraison.

La figure 7.25 est établie à partir de la loi de distribution des variations de consommation au long du délai moyen d'approvisionnement. Les limites inférieures et supérieures de consommation sont calculées à 90 %, à partir des données statistiques de consommation. Nous en déduisons les valeurs des deux stocks S_c et S_s.

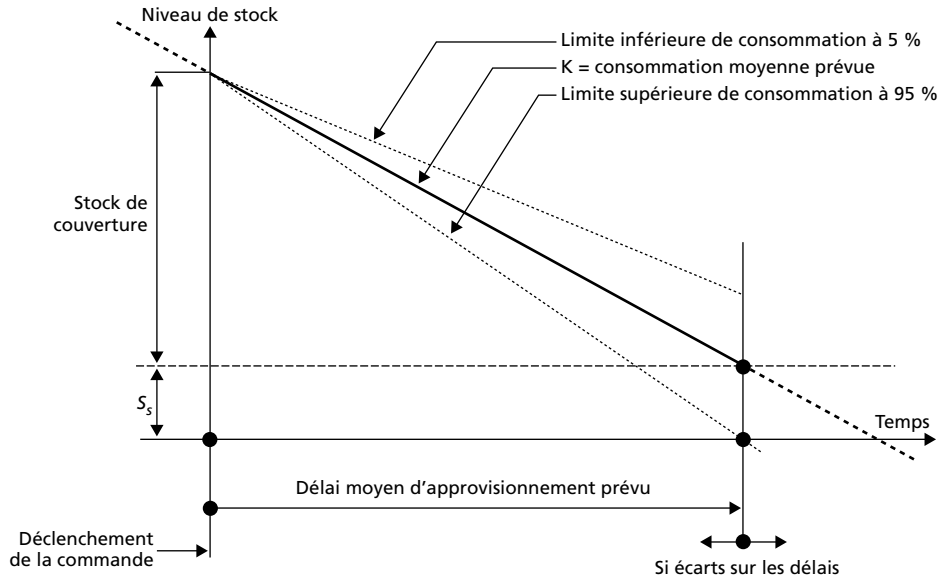


Figure 7.25 – Principe de la détermination du stock de sécurité S_s (sans écart de délai)

Notons que le stock de couverture S_c est un stock vivant, destiné à couvrir les besoins moyens pendant la période de réapprovisionnement. Le stock de sécurité S_s est un stock dormant (en valeur moyenne) : il va donc générer un *surcoût de stockage*.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

D'autre part, les facteurs précédents peuvent se conjuguer (consommation forte et délai court) pour générer une rupture de stock, donc un coût de rupture de la forme :

$$\textit{coût de rupture} = \textit{coût de pénurie} \times \textit{probabilité de rupture}$$

En fonction des enjeux, il faudra calculer le niveau optimal de stock qui minimise la somme : *surcoût de stockage + coût de rupture.*

7.3.3 Gestion spécifique des pièces de rechange

❑ **Caractéristiques des pièces de rechange**

□ **Méthodes d'approvisionnement**

Par nature, les pièces de rechange se prêtent aux méthodes 3 (gestion par point de commande) ou 4 (dates et quantités variables : gestion individualisée). C'est ce modèle 4 que nous allons développer spécifiquement, car il est le plus souvent absent des ouvrages de gestions de stocks.

Les critères de choix de la méthode d'approvisionnement sont principalement économiques, à savoir :

– le coût unitaire C_u de l'article, pièce ou module de rechange ;

– le coût annuel de possession $C_p = i \cdot C_u$; le coût de gestion des stocks intègre les coûts du capital immobilisé + les coûts de magasinage + les assurances + le risque de dépréciation. Il s'exprime en pourcentage du coût de référence, souvent estimé entre 20 et 30 % par an ;

– le coût de rupture de stock C_d : il est souvent égal au coût de défaillance d'un équipement ;

– le délai d de réapprovisionnement ;

– la nature de la loi de consommation, liée au taux de défaillance λ.

□ **Lot de maintenance d'un équipement**

Nous nommerons « lot de maintenance » la liste des rechanges afférente à un équipement donné. L'ensemble de ces lots de maintenance, établis pour chaque équipement (DTE) par le bureau des méthodes après identification des « doublons », forme le « fichier des rechanges » du stock à gérer. Le traitement de ces doublons (la même pièce interchangeable présente 8 fois, par exemple) permet d'alléger le stock : 3 seulement seront mises en stock.

À propos du lot de maintenance, le problème à résoudre par l'agent des méthodes est double :

– qualitatif : Quelles sont les pièces à posséder dans le lot de maintenance ?

– quantitatif *:* Combien doit-on en mettre en stock ?

□ **Choix qualitatif : contraintes techniques et budgétaires**

Le choix qualitatif des pièces et modules à posséder en stock s'appuie sur les préconisations du constructeur modulées par l'expérience des techniciens (détection des pièces dites d'usure). Il sera ensuite progressivement optimisé par l'historique des consommations. Notons l'intérêt d'avoir en stock un « module » rapidement inter-

changeable par « dépose », mais sans démontage, ce qui diminue les temps et les coûts d'immobilisation d'un équipement sensible.

La détermination « technique » du fichier des rechanges débouche sur une dépense de stockage qui s'avère souvent supérieure à la part du budget prévisionnel consacrée aux rechanges. Il appartient alors au responsable du service de réduire cette dépense, par une démarche de sélection des pièces allant du prioritaire au « luxueux », en tenant compte du risque économique lié à la pénurie. Cette réduction de la mise en stock concerne la nature des pièces et leur nombre (S_s).

☐ Choix quantitatif

Le choix quantitatif du nombre s'appuie sur l'analyse à partir d'un « modèle poissonien » de la gestion d'un stock de pièces de rechange. Le champ d'application de ce modèle est limité aux rechanges (modules et composants coûteux) dont les caractéristiques sont les suivantes :

– une demande faible et aléatoire (liée au taux de défaillance λ supposé constant) ;
– relative à des pièces ou à des modules (sous-ensembles) coûteux ;
– mis en stock en quantité réduite (de 0 à 10) dont la probabilité de consommation annuelle K n'est pas nulle ;
– dont le coût de pénurie (en cas de rupture de stock) est important, car directement lié au coût d'indisponibilité (C_I) d'un équipement.

❑ Application de la loi de Poisson à la gestion des rechanges

☐ Loi de Poisson

La probabilité d'avoir x pièces consommées pendant le délai de réapprovisionnement est donnée par :

$$\text{Prob}(X) = \text{e}^{-x} \cdot \frac{\lambda^X}{X!}$$

X est une variable aléatoire discrète pouvant prendre les valeurs 0, 1, 2, 3… 10.

$E(x) = m$ est l'espérance mathématique. Elle est égale à la variance ν.

λ est le taux de défaillance moyen pendant le délai de réapprovisionnement.

☐ Méthode analytique de résolution

Le problème revient à déterminer le nombre de pièces à stocker, c'est-à-dire à déterminer le stock de sécurité S_s pour lequel le coût global est minimal.

L'espérance mathématique des excédents est donnée par la relation :

$$E(\text{excédents}) = \sum_{X=0}^{S_s} (S_s - X)P(X)$$

De la même façon :

$$E(\text{manquants}) = \sum_{X=S_s+1}^{\infty} (X - S_s)P(X)$$

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Le coût global est :

$$C_T = C_p \cdot E\ (\text{exc}) + C_d \cdot E\ (\text{manq})$$

C_p étant le coût de possession pendant le délai de réapprovisionnement. Si d est le délai exprimé en semaines, et $C_u \cdot i$ le coût unitaire annuel de possession de la pièce, alors :

$$C_p = C_u i \cdot d/52$$

C_d est le coût de défaillance ou coût de rupture de stock.

λ est le nombre moyen de défaillances/an.

Le taux de défaillance pendant le délai, exprimé en semaines, est donc $\lambda \cdot d/52$.

On démontre que le coût total C_T est minimal, ou que S est optimal, lorsque le risque de rupture de stock est égal à : $\dfrac{C_p}{C_p + C_d}$. D'où le mode opératoire, qui est une simulation économique :

1. fixer une valeur maximale pour S_s ;
2. calculer $P(o)$ à $P(n = S_s)$;
3. pour chaque valeur $n = S_s$, calculer l'espérance mathématique des excédents, puis des manquants, puis C_T ;
4. repérer le C_T le plus bas : il correspond au seuil de sécurité cherché.

Cette simulation est longue : c'est la raison pour laquelle la méthode a été traduite en abaque, d'utilisation beaucoup plus rapide.

☐ **Méthode graphique par utilisation d'abaque**

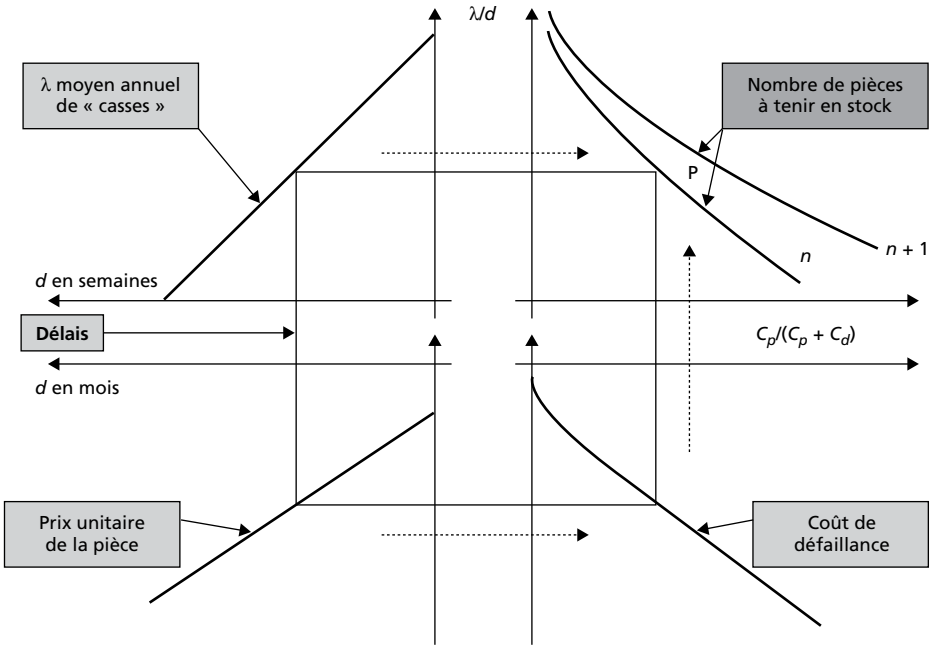


Figure 7.26 – Abaque donnant le nombre de rechanges (principe d'utilisation)

L'abaque présenté est relatif à un coût de possession de 20 %, ce qui signifie qu'une pièce de coût unitaire C_u = 900 € stockée pendant un an engendre un coût de possession de 900 × 20/100 = 180 € pour l'année. Si le délai de réapprovisionnement est de 2 mois, C_p/d = 180 × 2/12 = 30 €.

Structure de l'abaque : λ/d est le taux moyen de défaillance de la pièce pendant le délai de réapprovisionnement. C_p/d est le coût de possession de la pièce pendant le délai.

Cet abaque est multi-entrées. Les quatre entrées les plus classiques et minimales sont :

– le coût unitaire de la pièce C_u ;
– le délai de réapprovisionnement d ;
– le taux de défaillance annuel exprimé en nombre de pannes/an ;
– le coût de défaillance C_d (en maintenance) équivalant au coût de pénurie (en logistique).

Ces quatre données estimées nous amènent très rapidement au point P, à partir duquel nous choisirons la valeur n entière et supérieure (sécurité).

❑ **Abaques de détermination du nombre de rechanges à stocker**

Ces abaques sont présentés dans la figure 7.27 ci-après.

7.4 La fonction réalisation des interventions

7.4.1 Idées directrices d'organisation

❑ **Centraliser ou décentraliser ?**

La réponse ne peut se trouver qu'en ayant à l'esprit l'objectif recherché : garantir aux « clients » le meilleur rapport qualité, efficacité/coût des interventions. Dans cette optique, les idées directrices d'organisation sont :

– la centralisation hiérarchique du management et de la gestion ;
– la centralisation du bureau des « méthodes-ordonnancement », ce qui n'empêche pas les agents de méthodes d'avoir une responsabilité « sectorisée » ;
– la centralisation des moyens « lourds », d'où la notion d'atelier central de maintenance ;
– la décentralisation des équipes sectorisées en « antennes » à proximité du « client » ;
– la centralisation/décentralisation contrôlée des moyens informatiques par l'architecture « client serveur » ;
– la question des « magasins » n'est pas aussi tranchée : faut-il sectoriser plusieurs petits magasins, ou avoir un magasin « maintenance » à l'atelier central, ou un magasin général d'entreprise ?

Il est évident que chaque entreprise ne peut « idéaliser » son implantation et son organisation, car elle se trouve à un moment donné la résultante de son « histoire » : par son environnement, par la topographie du site, par sa structure et par les hommes qui la composent, etc.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

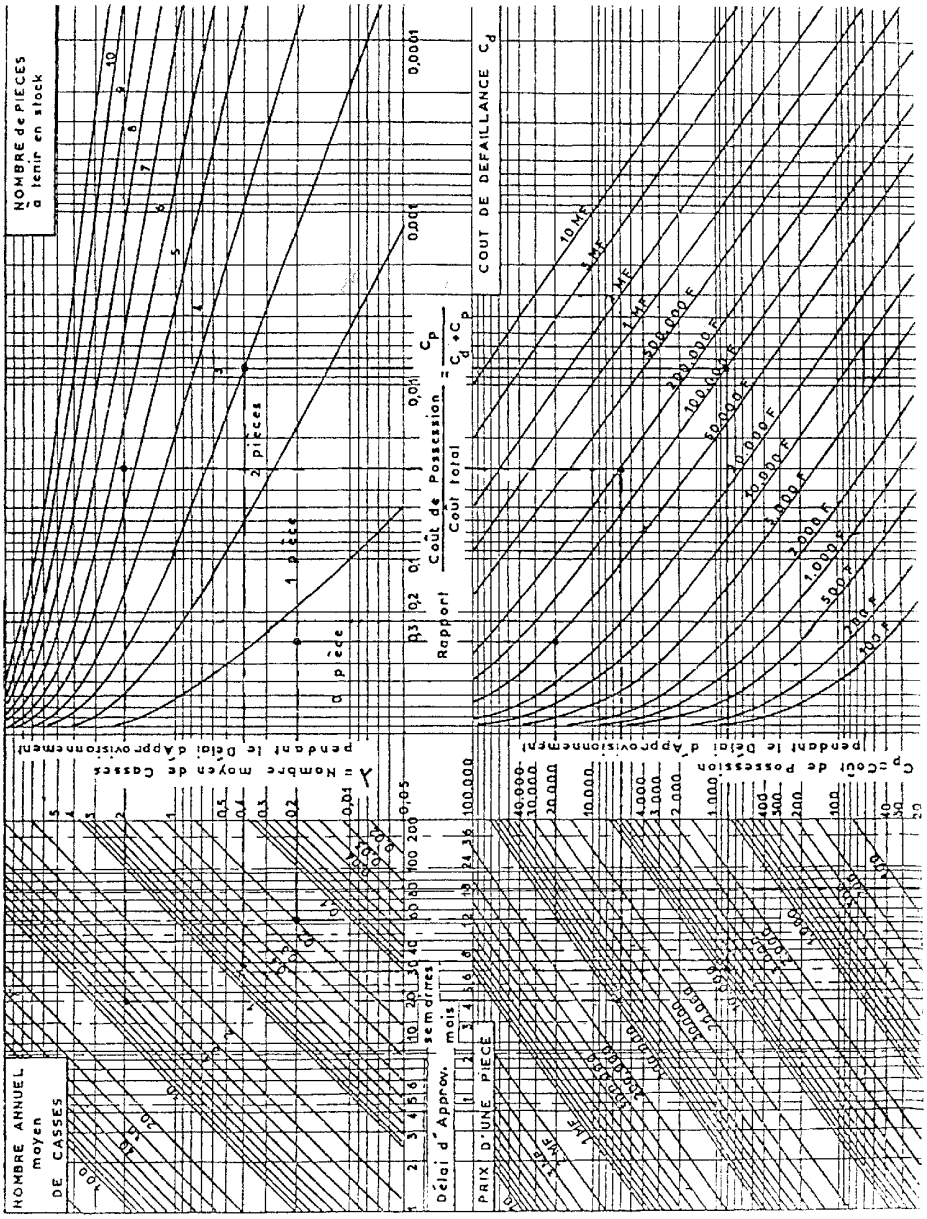

STOCK de DÉPANNAGE (casses imprévisibles)
Cp = 20 %
NOMBRE de PIÈCES à tenir en stock
COUT DE DEFAILLANCE Cd
NOMBRE ANNUEL moyen DE CASSES
PRIX D'UNE PIÈCE
Délai d'Approv.
mois
semaines
pendant le Délai d'Approvisionnement
Rapport Coût de Possession / Coût total = Cp / (Cd + Cp)
Cp = Coût de Possession
1 pièce
2 pièces
10 MF
5 MF
2 MF
1 MF
500.000 F
200.000 F
100.000 F
50.000 F
20.000 F
10.000 F
5.000 F
2.000 F
1.000 F
500 F
200 F
100 F

Figure 7.27

À l'époque récente de l'entretien, les services étaient régulièrement exilés à une extrémité du site : bien des services maintenance ont hérité de cette implantation non optimale, mais dont l'informatique de gestion ainsi que la télémaintenance réduisent le handicap de la distance.

De plus, les fréquentes « restructurations industrielles » contemporaines ne facilitent ni l'organisation rationnelle du service maintenance, ni la cohérence des politiques de maintien de l'outil de production.

❑ Centralisation hiérarchique et fonctionnelle

La maintenance étant devenue une fonction stratégique de l'entreprise, il est légitime qu'elle soit représentée par un cadre en contact avec toutes les forces décisionnelles de l'entreprise.

La centralisation permet la cohérence de la mise en œuvre des politiques de prise en charge des équipements et des procédures de communication en accord avec les objectifs généraux et les projets de l'entreprise. Au sein d'une unité de production, mais également au sein d'un groupe industriel.

> **Exemple**
>
> Cet exemple est « par défaut ». Dans un important groupe agroalimentaire constitué de nombreuses unités de production disséminées dans la Bretagne, chaque responsable de service maintenance achetait le logiciel de GMAO qui lui convenait. La situation devint difficile lorsqu'une volonté politique voulut harmoniser l'ensemble à partir de systèmes incompatibles !

À cet aspect de « centralisation hiérarchique » il faut lier la volonté de réduire les niveaux hiérarchiques pour plus d'efficacité opérationnelle. Remarquons enfin que la centralisation hiérarchique n'est pas incompatible avec le management participatif favorisant la concertation, l'expression et l'initiative à tout niveau.

7.4.2 Atelier central et antennes sectorisées

❑ Centralisation des moyens « lourds » : l'atelier central

Sur un site étendu, il est intéressant de disposer d'une « plate-forme d'intervention » où les différents équipements pourront être ramenés pour des opérations de niveaux 3 et 4 : réparations lourdes, révisions, modernisation, rénovation, etc. De même, pour chaque spécialité professionnelle, un atelier regroupera les moyens spécifiques à la profession : bancs d'essai, de réglage ou de diagnostic, testeurs, équilibreuses, etc.

Nous pouvons ainsi « idéaliser » un schéma d'atelier central, construit autour d'une plate-forme sur laquelle toutes les spécialités existantes peuvent intervenir en équipes polyvalentes à partir de leur propre atelier, à proximité immédiate de leurs outillages spécifiques (figure 7.28).

Cette structure a l'avantage de mettre en évidence le fait que la nécessaire polyvalence n'implique pas que chaque technicien soit polyvalent, mais que l'intervention soit réalisée par une équipe polyvalente. Il serait maladroit de faire cohabiter

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

dans le même local un électronicien et un chaudronnier, mais rien ne doit s'opposer à leur dialogue et à leur intervention en commun sur la plate forme, *l'objectif étant de briser l'état d'esprit corporatiste tout en respectant les savoir-faire professionnels.*

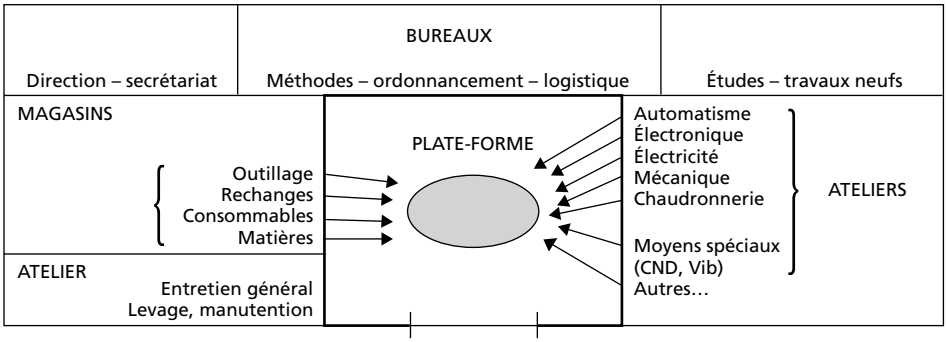


Figure 7.28 – Structure idéalisée d'un « atelier central » de maintenance

❑ Décentralisation des antennes d'intervention

L'objectif de la maintenance étant d'améliorer la disponibilité des installations et de participer à l'amélioration du taux de rendement synthétique (*TRS*), il lui faut être « présente » en temps réel sur le site.

La réduction des temps d'intervention et des distances ainsi qu'une présence favorisant le dialogue sont obtenues par la création d'une « antenne de maintenance » constituée, suivant la taille et la nature du secteur de production :

– d'un responsable, chef d'équipe maintenance du secteur de production ;
– d'un agent des méthodes attaché au secteur, bien que basé au bureau des méthodes ;
– d'une équipe de techniciens dépanneurs et soutiens des opérateurs dans une organisation TPM ;
– d'un local dédié à la maintenance, doté des moyens logistiques adaptés aux problèmes technologiques du secteur (DTE du secteur, écran de GMAO, outillages et rechanges spécifiques, etc.).

Chaque antenne peut être renforcée par des techniciens détachés de l'atelier central face à une surcharge conjoncturelle, ou une intervention lourde à réaliser *in situ*. Les avantages attendus de cette décentralisation sont :

– la meilleure connaissance des équipements du secteur, de leur « vie », de leur comportement normal puis dégradé, de leurs technologies et de leurs points faibles ;
– la qualité du dialogue avec les opérateurs « soutenus » et aidés, voire formés, par les techniciens d'antenne ;
– la possibilité accrue de réaliser diagnostics et expertises à partir des observations directes du terrain, donc de proposer des améliorations techniques et organisationnelles par « actions sur les causes » ;
– l'efficacité accrue de la surveillance et des interventions, par réduction des temps et des distances ;

– une meilleure concertation « maintenance avec le client production » par une présence permanente de la maintenance sur le site sans dépendance hiérarchique. Cette indépendance est souhaitable pour faire accepter les objectifs à moyen terme (préventif, révision, lubrification, etc.) relatifs au maintien d'un équipement dont la production a besoin à court terme.

7.4.3 Magasinage : les besoins de la maintenance

Nous avons vu que le débat « faut-il centraliser ou non » le magasinage est ouvert.

Pour : la rigueur de gestion des mouvements, l'unité des procédures quel que soit le client, l'interlocuteur unique, l'économie d'un seul système de stockage.

Contre : la distance/temps aux lieux de besoins, la lourdeur d'un « super marché » d'entreprise, la tendance « naturelle » en maintenance à créer des « stocks de proximité » certes utiles, mais échappant à tout contrôle.

Pour ou contre : l'adaptation à la topographie du site, à la volonté politique logistique du management, etc.

❑ Stockage de proximité

Dans la seule logique de maintenance, la présence de stocks de proximité semble indispensable.

– À l'antenne de secteur, un « stock d'atelier » permet de satisfaire les besoins logistiques des dépanneurs, improvisés de par la nature fortuite de la panne. Tout au moins pour ce qui concerne les outillages et les rechanges « standards » de type filtres, roulements, joints, visserie, graisses, etc.
– À l'atelier central, de la même manière, les besoins en matières d'un soudeur ne peuvent être satisfaits efficacement que par un stock de baguettes et de matières (profilés, tôles, etc.) à disposition immédiate.

L'informatique permet le suivi de ces stocks décentralisés, à condition d'une formation et d'un consensus sur les procédures choisies. L'utilisation du module « gestion des stocks » proposé dans toutes les GMAO facilite une bonne utilisation, les techniciens étant familiarisés avec l'outil. À condition qu'il soit compatible avec les procédures de l'entreprise. Il est évidemment important que *le système central de gestion des stocks ne soit pas déconnecté des réalités du terrain.*

❑ Quelques aspects spécifiques à la maintenance

☐ Codification des rechanges

La codification de chaque pièce de rechange doit permettre d'identifier aussi bien les références du fournisseur que les références de tous les équipements susceptibles de l'intégrer, et de trouver le gisement en magasin.

Au fichier de stock doit pouvoir correspondre le fichier de nomenclature d'un équipement (analyse arborescente) : c'est ce qu'on appelle « l'applicabilité » du stock vers les équipements. La vérification périodique de l'applicabilité permet de sortir du stock des pièces devenues inutiles.

Notons l'intérêt du système de codes à barres pour identifier les pièces et leurs mouvements.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ **Période de garantie et valeur actualisée**

Un dépanneur doit savoir si le module de rechange qu'il sort du magasin est sous garantie ou non, car une éventuelle réparation serait alors à la charge du fournisseur. De la même manière, il doit connaître la valeur actualisée de la pièce ou de l'ensemble afin de valoriser son BT.

☐ **Procédure d'échange standard**

Les pièces et les modules « réparables » sont consommés (sorties du stock) à l'issue d'un échange standard. La pièce ou le module une fois remis à niveau en interne ou en externe doit être réintégré dans le stock le plus rapidement possible.

Les pièces de rechanges les plus importantes peuvent être gérées « en suivi individuel », pour lequel la traçabilité du parcours est la première difficulté à résoudre. En aéronautique, où le suivi individuel est classique, ces pièces sont nommées les « rotables ». Responsabilité à partager entre le magasinier et l'agent d'ordonnancement, le suivi individuel doit permettre à tout instant de savoir le statut de la pièce :

– en stock, neuve (avec ou sans garantie) ou en bon état et disponible ;
– sortie du stock programmée (remplacement préventif), en attente de montage à tel endroit ;
– sortie du stock non programmée (en correctif), en attente de montage à tel endroit ;
– en service, montée sur tel équipement (heures de fonctionnement) ;
– en attente de réparation après dépose, dégradée, à tel endroit ;
– en cours de réparation, en interne (OT n°) ou en externe (DTE n°) ;
– réintégrée au stock et disponible (éventuellement, avec son potentiel d'heures) ;
– en attente de déclassement ou déclassée.

La traçabilité de ces modules sensibles doit comprendre le cumul des heures d'utilisation de façon à permettre un suivi fiabiliste à partir de l'historique complet de ces modules.

7.4.4 Les différents types d'interventions et leur définition

Notre propos est de recenser l'ensemble des actions que la maintenance est susceptible de mettre en œuvre, à partir des normes européennes CEN projet WI 319-003, ou à défaut, à partir des normes AFNOR X 60-010 ou sans norme lorsque l'usage professionnel seul consacre l'identification d'une action.

❑ **Analyse des éléments définissant une intervention de maintenance**

– La fonction méthode a pour objet de prévoir et de définir les composantes d'une opération de maintenance.
– La fonction ordonnancement a pour objet de lui fixer une date et de réunir les moyens à cette date.
– La fonction « réalisation » a pour objet d'utiliser les moyens mis à disposition, suivant les procédures imposées, pour réaliser une tâche définie et remettre le matériel dans un état spécifié.

La préparation doit clairement définir l'opération par son contenu (gamme d'opération) et par son résultat (paramètres de contrôle quantifiables si possible).

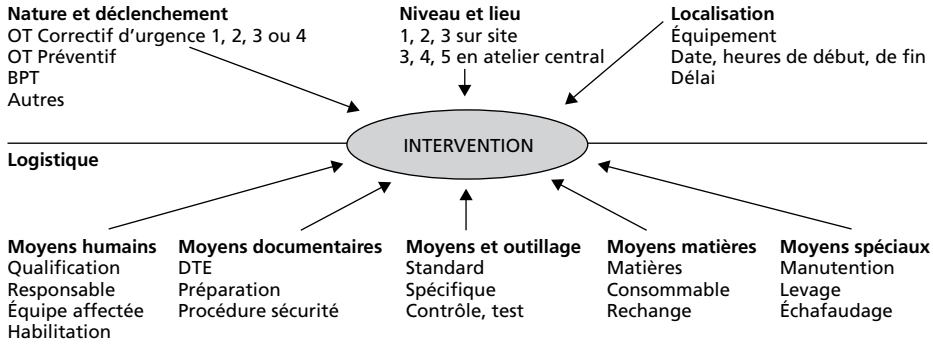


Figure 7.29 – Caractéristiques d'une intervention

❑ Opérations de maintenance corrective

□ Avant l'intervention corrective

– *Localisation :* « action menée en vue d'identifier le bien en panne au niveau de l'arborescence » (CEN).

– *Détection :* « action de déceler par une surveillance accrue l'apparition d'une défaillance (AFNOR) ».

– *Diagnostic :* « action menée pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause » (CEN).

□ Interventions correctives

– Dépannage : « action physique exécutée sur un bien en panne pour lui permettre d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce qu'une réparation définitive puisse être exécutée » (CEN).

– Réparation : « […] action physique exécutée sur un bien pour rétablir définitivement la fonction requise du bien » (CEN).

– Échange standard : « reprise d'un sous-ensemble ou ensemble usagé et « vente » d'un sous-ensemble identique, neuf ou remis en état spécifié […] ». La différence de valeur se nomme la « soulte » (AFNOR).

– Essai de bon fonctionnement : « actions menées après une action de maintenance pour vérifier que le bien est capable d'accomplir la fonction requise » (CEN).

– Essai de conformité : « essai destiné à montrer si une caractéristique […] est, ou non, conforme aux exigences nominales » (CEN).

D'autres termes génériques non définis se rapportent aux actions de maintenance corrective, comme le réglage, la lubrification, le démontage ou le remontage.

□ Cas des déposes

Le vocabulaire ci-dessous, non pris en compte par l'AFNOR ni par le CEN, est emprunté au *World Airline Technical Glossary.* La dépose se rapporte à des sous-ensembles nommés « modules » dans cet ouvrage, car la dépose caractérise la conception modulaire, le démontage la conception non modulaire. Un module se dépose sur site, puis est démonté en atelier.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– *Dépose :* mise à disposition d'un module d'un système grevant sa disponibilité.
– *Dépose programmée :* dépose effectuée lorsque la durée d'utilisation est proche de la limite prédéfinie.
– *Dépose justifiée :* dépose à la suite de laquelle une défaillance est découverte, qu'elle confirme ou non les raisons de la dépose.
– *Dépose confirmée :* dépose à la suite de laquelle on trouve une défaillance confirmant le motif de la dépose.
– *Dépose intrinsèque :* défaillance d'un élément d'un système utilisé normalement, dont la cause est interne au système.

La figure 7.30 propose un logigramme des déposes permettant par exemple une analyse statistique relative au bien-fondé des décisions de déposes non programmées (% de déposes injustifiées, % de déposes extrinsèques).

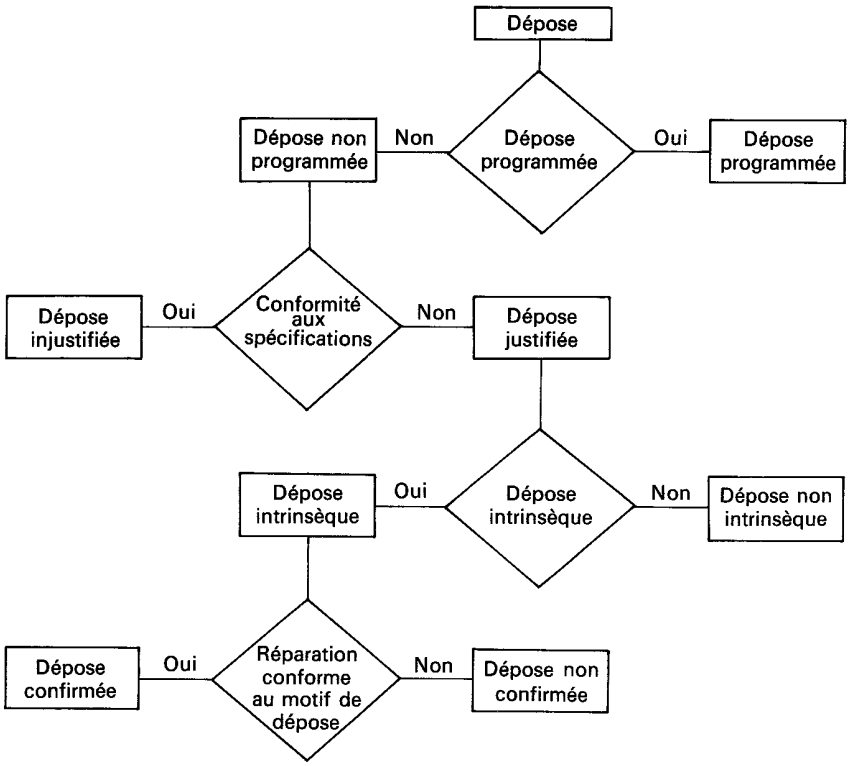


Figure 7.30 – Logigramme des déposes

❑ **Opérations de maintenance préventive**

☐ **Opérations de surveillance préventive**

– *Inspection :* « contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant, calibrant les caractéristiques significatives d'un bien » (CEN).

– *Contrôle :* « vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement » (AFNOR). Ce jugement peut être une information relevée ou une décision : rejet, acceptation, ajournement.
– *Test :* comparaison des réponses d'un dispositif à des sollicitations prédéterminées avec des réponses significatives d'un bon fonctionnement (AFNOR).
– *Surveillance de fonctionnement :* « activité exécutée manuellement ou automatiquement ayant pour objet d'observer l'état réel d'un bien » (CEN).
– *Surveillance active :* dans cet ouvrage, l'auteur nomme ainsi l'action de surveiller associée à une action d'initiative de premier niveau dans une logique d'automaintenance. Par exemple, j'observe que le niveau est bas et je le complète, que la lampe est grillée et je la change, ou que la courroie est détendue et je la retends.
– *Ronde :* surveillance et/ou inspection de plusieurs installations à partir d'une « route » préétablie.
– *Visite :* « opération de maintenance préventive consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments d'un bien et pouvant impliquer des opérations de premier niveau » (AFNOR).

☐ Interventions préventives

Suivant leur niveau et la nature du préventif, elles peuvent consister en « surveillance active », réglages, échanges standard, visites, etc., déjà définis.

Révisions : « ensemble complet d'examens et d'actions réalisés afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité » (CEN).

❑ Actions sur le matériel non en service

Toutes les définitions sont AFNOR.

– *Installation :* « mise en place du bien et de ses accessoires, et si nécessaire, raccordement de ses diverses entrées et sorties aux équipements dont il est tributaire ».
– *Mise au point :* « ensemble des essais, réglages et modifications nécessaires à l'obtention de l'état spécifié ».
– *Mise en service :* « ensemble des opérations nécessaires, après l'installation du bien, à sa réception, dont la vérification de la conformité aux performances contractuelles ».
– *Déverminage :* « opération destinée à éliminer ou à détecter les pièces ou composants non satisfaisants ou susceptibles de présenter des défaillances précoces ».

> **Remarque**
>
> Ce terme, dont l'usage professionnel est limité à l'électronique, est en fait applicable à tout domaine technologique. Le déverminage peut se réaliser de la fin du cycle de fabrication à la mise en service.

– *Mise en conservation :* « ensemble des opérations devant être effectuées pour assurer l'intégrité du bien durant les périodes de non-utilisation ».

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– *Mise en survie :* « ensemble des opérations devant être effectuées pour assurer l'intégrité d'un bien durant les périodes de manifestations de phénomènes d'agressivité de l'environnement à un niveau supérieur à celui défini par l'usage de référence ».
– *Remise en état de service :* opérations consécutives aux précédentes, effectuées dans le but de retrouver les performances contractuelles.

❑ **Autres travaux de maintenance**

– *Amélioration :* « ensemble des mesures techniques, administratives ou de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise » (CEN).
– *Modification :* « ensemble des mesures techniques, administratives ou de gestion, destinées à changer une fonction d'un bien » (CEN).
– *Reconstruction :* « action suivant le démontage du bien principal et le remplacement des biens qui approchent de la fin de leur durée de vie et/ou devraient être systématiquement remplacés » (CEN).

Remarques

La reconstruction peut inclure des améliorations et des modifications.
Le CEN n'a pas retenu la *rénovation,* action proche de la reconstruction, définie par l'AFNOR comme « l'inspection complète de tous les organes, avec reprises dimensionnelles, remplacement des pièces usées, réparation des sous-ensembles défaillants, conservation des pièces bonnes puis vérification des caractéristiques ».

7.5 L'environnement des équipements : « les 5 S machine »

« L'atelier est le poumon de la production : il a besoin d'air pur. »

7.5.1 Enjeux de la maîtrise de l'environnement des équipements

❑ **L'amélioration de l'interaction homme/équipement est un enjeu majeur de qualité totale**

☐ **Réflexion d'introduction**

Dans notre société française, d'essence « latine », la fonction nettoyage est une fonction déconsidérée.

– Par notre éducation collective, d'abord : dès l'école maternelle, l'enfant trouve normal que la salle de classe qu'il a laissée sale et en désordre le soir soit claire et nette le matin. Il est « normal » que « on » fasse ce travail en se levant à 5 heures du matin… « On » ne concerne même pas l'enfant : il l'ignore… Et la suite de notre histoire éducative, sauf exception, est dans la même logique. D'autres modèles éducatifs existent, qui refusent cette négligence banalisée. En Asie du Sud-Est (Japon, Corée) et en Europe du Nord, entre autres.
– Par notre longue histoire industrielle, ensuite : l'image de l'industrie crasseuse a longtemps perduré, le niveau d'exigence à cet égard ayant longtemps été maintenu au strict minimum : éponger une fuite d'huile sur le sol, remplacer un carreau cassé !

Les habitudes corporatistes sont intéressantes à observer, dans le cadre de la relation homme/machine, car elles sont très contrastées, allant du : « Je suis payé pour fraiser, pas pour nettoyer la fraiseuse » au respect de l'outil, voire à l'appropriation de la « machine ». Pensons au rail, à « la bête humaine », à ces locomotives à vapeur, salissantes mais souvent maintenues rutilantes par la fierté de leurs conducteurs.

Le marin « s'approprie » son bateau, en est souvent fier et ne rechigne pas à le tenir propre (il y a aussi des exceptions dans la marine…). En voile de compétition, la performance passe par un plan de pont simple, clair et fonctionnel, par une carène très propre et par un rangement soigné de tous les « accessoires » en attente.

Que penser de cette introduction ?

1. Que la qualité de l'environnement d'un système de production conditionne sa performance.
2. Que l'obtention de cette qualité d'environnement passe par la motivation, le soin et la rigueur des utilisateurs de ce système.

☐ **Impact de la propreté des installations sur les technologies et la maintenance**

Le plus évident est d'observer les contraintes qui s'imposent d'elles-mêmes (salles blanches en fabrication de puces électroniques, atmosphère contrôlée pour mécanique de précision, etc.) ou qui sont imposées (règlements d'hygiène des équipements en industries agroalimentaires ou pharmaceutiques). En dehors de ces secteurs particuliers, l'impératif de propreté apparaît évident en maintenance :

– la détection précoce d'une défaillance (fissure, fuite, desserrage, usure anormale, etc.) et les inspections préventives (surveillance d'un niveau) ne sont possibles que sur une machine propre ;
– les analyses de défaillance de composants (capteurs, contacts, etc.) et plus encore de microarrêts amènent souvent à incriminer le manque de propreté et, facteur aggravant, comme « mode commun de défaillance » ;
– les durées d'intervention sont réduites si le dépanneur n'est pas obligé de passer la première demi-heure à nettoyer l'équipement en panne ;
– *exemple inverse*, montrant l'intérêt de la formation et des procédures de nettoyage : le nettoyage « haute pression » sur des composants ou armoires électriques n'est pas toujours une bonne idée…

Ces quelques exemples montrent que le maintien de la propreté des équipements et de leur environnement est le premier geste de maintenance préventive. Illustrons l'impact de la propreté sur la baisse d'un flux lumineux (figure 7.31). A est la dépréciation propre aux lampes, B est dû à l'empoussiérement des lampes, C est dû à l'empoussiérement des parois du local.

Notons le cas des « salissures techniques intrinsèques », qui sont des dégradations telles que le calaminage des cylindres, le colmatage de filtres, la contamination d'un lubrifiant, l'entartrage de tubes, etc. Ces nettoyages techniques rejoignent les opérations de maintenance préventives (plutôt que correctives), systématique ou conditionnelle, internes ou externalisées, à l'exemple du nettoyage des tubes de chaudières à vapeur qui requiert un matériel spécifique.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

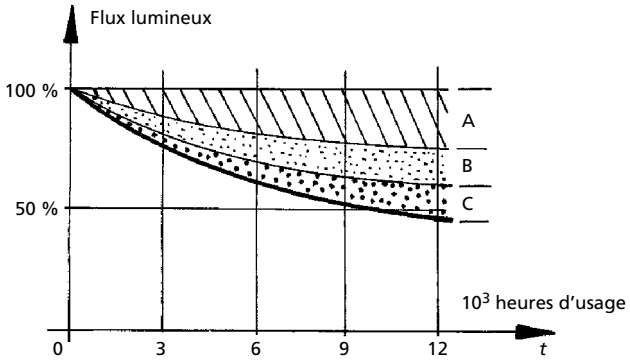


Figure 7.31 – Exemple de dégradation fonctionnelle due à la salissure

☐ **Impact de la propreté des installations sur la qualité totale (la production et les hommes)**

Le manque de propreté mais aussi de rigueur (rangement, ordre) génère des risques :
– de perte de précision et de qualité sur la production,
– d'accident du travail (un capteur sale ne détecte plus une présence humaine),
– d'incendie (de la sciure dans une armoire électrique),
– de manque d'hygiène et de maladies professionnelles,
– de rejet des conditions de travail inacceptables, ou peu satisfaisantes,
– de démotivation de salariés (comment vouloir faire du bon travail dans un environnement dégradé),
– de perte de client, en cas de visite, d'audit ou d'accident médiatisé,
– de dégradation de l'image de marque.

Dresser une liste exhaustive serait vain : résumons en disant que le manque de propreté en site industriel est à la fois cause de non-qualité des produits ou services et marque de mépris des hommes qui y travaillent.

❑ **Propreté des installations : quel est le projet d'entreprise ?**

Listons les *différents objectifs* possibles en matière de propreté pour un site industriel :
– minimaliste : le minimum dans les limites réglementaires;
– commercial : faire du site une vitrine de la qualité des produits;
– technique : nettoyons et rangeons pour faire chuter le taux de pannes;
– sécuritaire : nettoyons et rangeons pour faire chuter le taux d'accident;
– esthétique : le bâtiment et ses abords sont architecturés, soignons l'intérieur;
– social : les salariés doivent se sentir bien dans leur environnement;
– productiviste : les salariés doivent se sentir bien pour être plus efficaces;
– environnementaliste : visons l'ISO 14000 qui a des retombées dans la maîtrise de l'environnement interne;
– économiste : où se trouve l'optimal entre les coûts directs du nettoyage et le coût des risques encourus par manque de propreté ?

En fait, l'objectif choisi ne peut être que synthétique par rapport à tous ces critères, mais il doit être clairement identifié pour permettre une définition des responsabilités et des moyens. La mise en œuvre d'un « *plan propreté* » doit se gérer sur la durée (par opposition à l'opération « coup de balai pour l'inspection » chère aux militaires).

Le service maintenance sera naturellement partenaire de ce projet, et son relais pour ce qui concerne les équipements. Particulièrement dans le cadre d'un projet TPM ou d'automaintenance développé au paragraphe 7.5.3.

7.5.2 Nettoyage en interne ou en prestation de service ?

❑ Importance de la propreté

L'absence de propreté est préjudiciable au bon fonctionnement des machines et ce pour plusieurs raisons :

– La saleté masque les défauts.

– Les poussières et dépôts d'huile dégradent les conditions de fonctionnement des machines : filtres d'aération encrassés, courants de fuite, échauffement des huiles de commande, grippage des surfaces en frottement, décomposition des peintures ou vernis protecteurs, contamination des métaux, etc.

L'absence de propreté et de rangement nuit aux performances des hommes :

– Temps perdu, clé adéquate remplacée par une pince qui arrondit l'écrou, marteau remplacé par une clé à molette.

– Instauration d'un climat de laisser-aller.

Cela concerne les machines mais également les locaux de travail, vestiaires, sanitaires. Une action de type 5s devra commencer par ces derniers pour « montrer l'exemple ».

Cette prise en compte du management de la propreté est souvent rendue difficile en France, car les managers ont du mal à accepter ce genre de mission.

Mais les retours d'expérience sont formels : le management qui n'a pas su imposer le 5S ne saura pas plus imposer l'esprit de la TPM qui nécessite de la rigueur et de la constance de la part de tous et une vigilance de tous les instants.

❑ Services intégrés ou externalisés ?

Selon la stratégie actuelle du « *recentrage des entreprises sur leur métier* », il semblerait logique d'externaliser le service de nettoyage des locaux et l'entretien des « périphériques ». Le tableau est pourtant diversifié : 91 % des structures d'enseignement ont un service intégré (avec beaucoup d'emplois « palliatifs » type CES), 60 % des hôpitaux et des industries, 10 % de la grande distribution, etc.

Dans l'industrie, les habitudes de nettoyage du poste par son occupant et la présence de services « entretien général » expliquent la modestie de la part externalisée (40 % en 1996). Remarquons le peu de transparence du travail en interne : coûts difficiles à maîtriser, peu de flexibilité des équipes, par ailleurs difficiles à encadrer, etc.

Pour ce qui est de l'entretien des équipements, qui exige une réelle technicité, la tendance est à l'autonettoyage non plus dans le cadre de la simple « responsabilité individuelle de son poste de travail » mais dans le cadre, beaucoup plus ambitieux, de l'automaintenance dévolue à une équipe.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

7.5.3 Les 5 S : projet autonome ou étape de la TPM ?

❑ **Les 5 S : une « japonaiserie » à méditer, puis à appliquer en France**

□ **Démystifions…**

Les essais de traduction « dans l'esprit » plus que dans la lettre proposent les cinq concepts suivants :

1. *seiri,* le rangement, le débarras : éliminer l'inutile et le superflu;
2. *seiton,* l'ordre, les méthodes : « une place pour chaque objet, chaque objet à sa place »;
3. *seiso,* le nettoyage : maintenir la propreté et l'hygiène des outils, de l'équipement, du poste;
4. *seiketsu,* l'inspection, le contrôle, la visualisation : mettre en évidence les défauts;
5. *shitsuke,* la rigueur, la discipline : respecter les règles et les autres;

et parfois, afin de parfaire notre japonais :

6. *shikkariyaro,* appliquons-nous.

Ces notions s'appliquent à une « équipe autonome » affectée à une « unité de travail », correspondant à un découpage topographique homogène d'un ensemble d'équipements bien identifié à l'intérieur du site.

□ **Faciles à comprendre, difficiles à bien appliquer…**

Ces règles de bon sens concernent tous les hommes de l'entreprise, au-delà des hiérarchies. Les nombreuses expériences de mise en œuvre réalisées en France montrent que l'application est *possible* (par adaptation à nos méthodes de travail) et efficace à condition de s'appuyer sur une démarche *participative.*

Un effet visible est le développement de salles blanches à empoussiérement de classe 100, parfois 10 non plus seulement dans l'industrie électronique ou spatiale, mais dans l'automobile et chez ses équipementiers. Le travail « en blanc » au lieu du « bleu d'atelier » n'est pas seulement symbolique : il est productif.

Les avantages du développement des 5 S sont à la fois :

– techniques (nous les avons déjà décrits),

– psychologiques (les 5 S s'inscrivent dans un management participatif),

– sécuritaire (par réduction des accidents et des maladies professionnelles),

– économiques (par réduction de toutes les pertes de productivité).

Les 5 S sont la marque d'une volonté d'établir un nouveau rapport de l'homme à son entreprise et à son outil de production, sans renier notre culture, sans nous transformer en japonais, mais en remettant en cause certaines de nos habitudes.

❑ **Situation et enjeu de l'automaintenance**

C'est au début des années 1980 que les concepts de la *total productive maintenance* (TPM) ont été introduits en France par JMA (Japan Management Association), le livre de référence de S. Nakajima (NAK 86) ayant été traduit par l'AFNOR en 1986 (voir § 10.2 sur la TPM).

Nakajima présente une méthodologie d'implantation de la TPM en 12 étapes, l'étape 8 étant consacrée à l'organisation de l'automaintenance par les exploitants. Quel bénéfice une entreprise européenne peut-elle tirer de ces méthodes participatives, qui ont largement fait la preuve de leur efficacité ? Trois niveaux de mise en œuvre d'un plan 5 S sont envisageables :

– l'entreprise affirme sa volonté d'adapter à ses réalités l'ensemble d'un plan TPM, projet d'entreprise ambitieux et long comprenant le développement des 5 S qui nous intéresse dans ce chapitre ;
– l'entreprise s'engage dans une logique d'automaintenance, limitée au transfert de compétence vers les exploitants, et comprenant le développement des 5 S ;
– l'entreprise développe un plan 5 S autonome.

Notons que le développement d'un plan 5 S en amélioration de l'environnement interne peut être lié à la recherche d'une certification ISO 14 000 consacrée à la maîtrise de l'environnement externe de l'entreprise.

❑ Plan d'action 5 S

Nous allons nous inspirer du plan 5 S de chez Renault (tableau 7.7), qui préconise la méthodologie suivante à partir de l'identification de « l'unité élémentaire de travail » nommée « chantier ».

□ Phase de préparation

1. Constitution du groupe de travail 5 S.
2. Formation du groupe de travail.
3. Constat 5 S du chantier (état initial).
4. Organisation des quatre étapes du plan 5 S : nettoyage initial, optimisation, formalisation et perpétuation.
5. Formation des opérateurs aux 5 S.

□ Phase de réalisation

Afin d'assurer la pérennité des résultats et pour soutenir la motivation des acteurs, des audits de 5 S sont programmés périodiquement, chacun étant suivi d'un plan d'amélioration.

Tableau 7.7 – Plan d'action 5 S (d'après document Renault)

5 S	Nettoyage initial	Optimisation	Formalisation	Perpétuation
RANGEMENT	Trier ce qui est utile et inutile	Classifier les choses utiles	Établir les règles de rangement	Stabiliser
ORDRE	Jeter ce qui est inutile	Définir la manière d'ordonnancer les objets	Afficher visiblement les règles ainsi définies	Maintenir

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Tableau 7.7 – Plan d'action 5 S (d'après document Renault)

5 S	Nettoyage initial	Optimisation	Formalisation	Perpétuation
NETTOYAGE	Nettoyer les installations pour la 1re fois	Localiser les endroits difficiles à nettoyer et y remédier	Rechercher les causes de salissure et y remédier	Améliorer
PROPRETÉ	Éliminer ce qui n'est pas hygiénique	Déterminer les zones sales	Mettre en place les gammes de nettoyage	Verrouiller
RIGUEUR	S'habituer à appliquer 5 S au sein du chantier			Audit 5 S vers l'atelier idéal

❑ Plan d'action automaintenance de Nakajima

Nakajima (directeur du Japan Institute of Plant Maintenance) est le principal promoteur de la TPM. En complément de la démarche 5 S Renault, nous donnons la procédure d'application de l'automaintenance en sept étapes incluant les 5 S qu'il nous propose dans NAK 86.

1. Nettoyage initial. Élimination totale des poussières et salissures du poste (pour faire comprendre que le nettoyage « est une inspection »); mise en pratique du graissage et du resserrage; révision des dégradations et remise en état.
2. Élimination des sources de salissures. Les difficultés de nettoyage et de graissage font l'objet d'amélioration pour raccourcir le temps de nettoyage et de graissage.
3. Établissements des standards de nettoyage. Les normes d'action sont établies pour que le nettoyage soit effectué sûrement et rapidement (indication du temps réservé quotidiennement).
4. Inspection générale. Formation aux techniques d'inspection. Énumération des défauts mineurs de l'installation, et remise en état.
5. Auto-inspection. Établissement de la « check-list » d'auto-inspection.
6. Ordre. Standardisation des rubriques de contrôle : standard d'inspection de nettoyage, standard de flux matières, standard d'enregistrement de données, standard de contrôle d'outillages, etc.
7. Perfectionnement du comportement participatif. Déclinaison à chaque niveau hiérarchique des orientations, activation des améliorations.

❑ Une idée force de la maintenance

« La seule façon d'obtenir la propreté n'est pas de nettoyer, mais d'éviter de salir », donc de s'attaquer aux sources de salissures.

Cette idée de rechercher les causes « en amont » pour éviter des actions « sur l'effet » est une idée force de la maintenance. Pour ne pas avoir à dépanner, il faut s'atta-

quer aux causes des pannes. Si l'on ne veut plus avoir à régler, il faut assurer la pérennité des réglages. Régler, dépanner, nettoyer ne doivent plus apparaître comme des actions normales, mais exceptionnelles.

L'action la plus en amont, donc la plus efficace, est l'intégration à la conception. En analogie avec la maintenabilité, la « nettoyabilité » peut et doit être intégrée à la conception. Le choix d'un sol industriel « maintenable » est en bon exemple d'anticipation possible d'un problème insoluble ou difficile à résoudre ensuite.

Dans le cas du nettoyage industriel, pensons au problème des scieries d'automatisation récente dont la production de lambris a été multipliée par 10 en quelques années : la production de sciure a naturellement suivi, ce qui aurait dû amener à multiplier par 10 le nombre de nettoyeurs ! Ajoutons à cet effectif pléthorique le risque d'incendie et le risque de dysfonctionnement des automatismes. La sciure est aujourd'hui « aspirée » à la source d'émission, stockée puis valorisée, et la scierie a le niveau de propreté d'un laboratoire.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

8 • LA FONCTION GESTION DU SERVICE MAINTENANCE

8.1 Réussir sa GMAO (gestion de la maintenance assistée par ordinateur)

8.1.1 La fonction gestion : avant de parler GMAO, parlons gestion…

❑ **« Gérer, c'est prendre des décisions en connaissance de cause »**

Si l'on accepte cette définition, on constate que chaque individu est naturellement appelé à gérer, au minimum, son propre budget et son emploi du temps. Dans l'entreprise, la gestion n'est plus l'apanage du « chef » : elle est très décentralisée et répartie sur plusieurs niveaux hiérarchiques aussi bien que sur chacune des fonctions. De plus, la gestion peut être une responsabilité individuelle ou une prise de décision collective (voir § 9.2, Le management participatif).

Chaque fonction obéit à des techniques de gestion spécifiques : on ne gère pas les stocks avec les mêmes outils que le personnel ou que le budget. Cet ouvrage étant structuré à partir des sous-fonctions de la maintenance, chaque chapitre contient des éléments de gestion de cette sous-fonction, l'essentiel de la gestion se faisant au niveau du bureau des méthodes et au niveau de la direction du service, avec ou sans l'aide d'une GMAO.

❑ **Le modèle itératif de la gestion**

Le modèle itératif « Observer, Réfléchir et Agir », toujours recommencé, est un modèle de gestion « naturel », puisque calqué sur le modèle de fonctionnement de l'homme. Il est important de noter qu'il contient une potentialité de progrès, à partir de l'observation des résultats de l'action.

❑ **Application à la gestion du service maintenance**

La figure 8.1 illustre la place omniprésente de la « base de données » qu'est une GMAO, ce qui ne doit pas faire oublier que les phases « productives » sont l'action, la connaissance et la décision ! Les structures d'analyse des informations puis de prise de décisions sont réparties entre le bureau des méthodes, le bureau d'ordonnancement et de logistique et la direction du service, en fonction de l'organisation en place.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

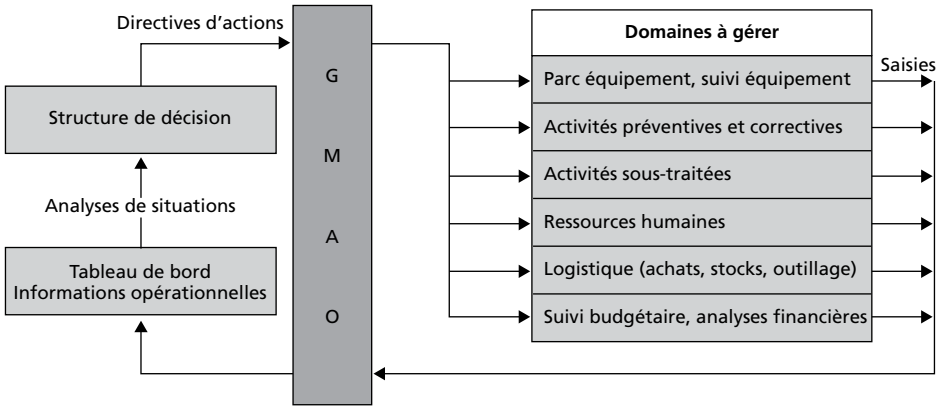


Figure 8.1 – Gestion itérative de la maintenance (avec support d'une GMAO)

8.1.2 L'outil GMAO : une assistance « nécessaire, mais non suffisante »

❑ Qu'est ce qu'un progiciel de GMAO ?

Empruntons à M. Gabriel et Y. Pimor (GAB 85), *Maintenance assistée par ordinateur,* leur définition : « Un système informatique de management de la maintenance est un progiciel organisé autour d'une base de données permettant de programmer et de suivre sous les trois aspects techniques, budgétaire et organisationnel, toutes les activités d'un service de maintenance et les objets de cette activité (services, lignes d'atelier, machines, équipements, sous-ensembles, pièces, etc) à partir de terminaux disséminés dans les bureaux techniques, les ateliers, les magasins et bureaux d'approvisionnement. »

Quinze ans après, la mise sous informatique de la gestion d'un service maintenance de PME apparaît incontournable : mais sous quelle forme et pour quoi faire ? *Les réponses sont dans le service maintenance, et nulle part ailleurs*. Avec l'aval de la direction (intégration dans l'informatique de l'entreprise et ses évolutions futures) et avec l'aide éventuelle d'un « conseil » qui a l'avantage de pouvoir jeter un regard objectif (par audit du service) sur la situation de départ. C'est dans cet esprit que l'ADEPA et le CETIM ont édité la plaquette (ADE 94) consacrée à « l'autodiagnostic maintenance, préalable à la GMAO ».

❑ Le MAO (miracle assisté par ordinateur) n'aura pas lieu…

La cause première d'échec en exploitation des GMAO est contenue dans l'attente d'un *investissement miracle*. Il y aura échec :

– là où il n'y avait pas d'organisation rationnelle de la maintenance,

– là où les besoins à satisfaire n'ont pas été identifiés ni approfondis,

– là où il n'y avait ni service méthodes, ni ordonnancement efficaces,

– là où les gens ne sont pas motivés, ou pas compétents, ou mis devant l'écran sans préparation,

– là où il n'y a pas de démarche consensuelle d'introduction de l'outil.

L'échec viendra, le plus souvent, par refus de l'outil de la part des acteurs. Et s'il n'y avait pas une bonne organisation avant, ce sera pire après ! La démarche de « consommateur d'informatique », parce que le concurrent a acheté une GMAO, ou parce que c'est proposé dans les revues et dans les salons, ou parce que c'est « la mode », est vouée à l'échec.

GM (gestion de la maintenance) : c'est avant tout la compétence de l'acquéreur-utilisateur.

AO (assistance informatique) : c'est la compétence du vendeur (qui n'ignore pas la maintenance, mais ne connaît pas votre entreprise !).

Une GMAO investie est une « valise pleine d'informatique et vide de maintenance » : il s'agit de la remplir, puis de la faire vivre à l'intérieur d'une organisation préalablement éprouvée.

❑ Un outil incontournable

Nous avons vu qu'il existe des prérequis à l'acquisition d'une GMAO. Mais dès lors qu'un service maintenance est structuré et a fait la preuve de l'efficacité de son organisation, l'outil GMAO se révèle indispensable par sa capacité de mise en mémoire, par ses possibilités de traitement d'informations, par ses interfaces et par sa réactivité.

Même dans une petite entreprise, la base de données atteint une taille impressionnante en « équivalent papier » ! Il suffit de penser au fichier des articles en stock, au fichier des fournisseurs, au parc matériel décomposé et au nombre d'interventions et de transactions effectuées chaque jour pour s'en convaincre. D'autres facteurs rendent à terme l'exploitation de la GMAO incontournable :

– la « convivialité » des acteurs dans la cohérence du système : tout le service parle le même langage, l'information est partagée ;
– la potentialité d'améliorations et d'optimisation : la GMAO est un vecteur de changement ;
– la traçabilité des procédures et des actions requises en qualité (certifications ISO 9000) ;
– le besoin de suivi des coûts et de contrôle économique ;
– l'intérêt de ses interfaces avec la comptabilité, les achats, les systèmes de GTC, les logiciels de GPAO, etc. ;
– la sécurité de fonctionnement du système, moyennant certaines précautions.

Quelques remarques sur la sécurité : le degré de sécurisation des GMAO est un critère d'écart de coût entre les produits. Il concerne :

– la préservation du système face à la panne, aux virus, aux piratages et autres malveillances ;
– la préservation de l'intégrité de la base de données face à des erreurs de manipulation, à de la malveillance, et aux « pannes-système » ;
– la protection des accès.

En cas de départ de l'entreprise d'un cadre, quelles sont les précautions anticipées pour éviter une fuite de données ? Ce danger lié à la décentralisation de l'informatique nous amène au choix stratégique de l'architecture du système.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

8.1.3 Les tendances évolutives des architectures des systèmes informatiques

❑ Architecture client-serveur

Nous pouvons opposer deux architectures de systèmes d'informatique :

– l'architecture centralisée, correspondant à une volonté de contrôler toute décision et toute information dans un mode de management fortement hiérarchisé (et peu compatible avec une maintenance efficace) ;

– la prolifération anarchique d'outils informatiques individuels (*personnal computer*) où chacun génère sa propre base de données et ses logiciels.

L'architecture « client-serveur » concilie ces besoins, permettant la centralisation de certaines données, la sectorisation de certaines autres et l'individualisation par la micro-informatique.

Décrivons la structure d'un système « client-serveur ». Un système central, *le serveur* distribue par un réseau supervisé des données traitées à distance par des micro-ordinateurs *clients*. Le progiciel de GMAO est géré par le serveur. Les PC clients gèrent les programmes exécutables (outils informatiques individuels). Quels en sont les avantages :

– la puissance totale est accrue par le nombre de postes clients, chacun ajoutant sa propre puissance de traitement à l'ensemble ;

– la puissance des logiciels collectifs est mise au service de chaque client ;

– la possibilité qu'a chaque utilisateur-client d'utiliser ses propres logiciels applicatifs.

Des inconvénients existent : citons la faible vitesse de traitement pour des gros fichiers, la vulnérabilité aux virus apportés en externe et la difficulté de maintenir des technologies hétérogènes et dispersées.

❑ Architecture Web

Dans ce type d'architecture, il n'y a plus de programmes exécutables installés au préalable sur les PC « clients » ce qui facilite leur maintenance informatique.

Il y a deux serveurs (parfois regroupés physiquement dans un seul, mais logiquement distincts) :

– le serveur d'application qui comprend les programmes de traitement de l'information lesquels sont divisés en deux parties complémentaires :
  • une partie sur le poste client : (PC de l'utilisateur) : elle comprend des petits programmes (applet Java ou du Javascript par exemple) de vérification, de contrôle ou de calcul qui s'exécutent à l'intérieur du browser de l'internaute de manière totalement transparente (par exemple vérifier le format d'une date, vérifier le format d'un montant introduit par l'utilisateur, vérifier que tous les éléments d'un formulaire sont remplis avant de les envoyer vers le serveur, etc.),
  • une partie qui s'exécute sur le serveur d'application qui représente la part la plus importante ;

– le serveur de présentation avec des modules de mise en page et de présentation de l'information destinée à l'utilisateur final.

L'architecture Web facilite les communications à longue distance.

❑ **Architecture type Citrix, Network Computing**

Elle permet entre autres fonctions de transformer des applications client serveur en architecture Web.

L'option client léger proposée en plus permet des postes à plus faible coût car ils n'ont pas de disques durs et l'utilisation de clés USB est réglementée. C'est aussi une protection contre les virus ou logiciels espions et une volonté de maîtriser l'informatique de l'entreprise.

❑ **Systèmes de gestion des bases de données (SGDB)**

Les premiers systèmes de GMAO ne comportaient pas de SGDB, les données étant alors réparties sur plusieurs fichiers. Aujourd'hui, les bases de données de type « relationnel » sont des systèmes complexes ayant pour fonction de *conserver,* de *gérer* et de *protéger* les données entrées dans un ordinateur, grand système ou micro-ordinateur. Pour les grands systèmes, la base de données la plus diffusée est Oracle. Citons aussi IBM, SQL Server. Pour les micro-ordinateurs, citons Access.

Pour l'exploitant, au niveau de l'entreprise, le choix du SGDB est difficilement réversible car les logiciels applicatifs en comptabilité, finances, GPAO et GMAO ne communiquent que s'ils partagent la même base de données. D'où l'importance des critères de « capacité d'évolution » et de « pérennité » de l'éditeur lors du choix d'un SGDB.

8.1.4 Les progiciels de GMAO : l'offre du marché

Les progiciels de GMAO ne datent pas des années 1980 : dès l'apparition de l'informatique de gestion, les secteurs pionniers de la maintenance, la pétrochimie et l'aéronautique en particulier, développèrent leurs propres logiciels. Mais c'est à partir de 1980 qu'une offre de logiciels dédiés aux PME (Sirlog en France) est apparue sur le marché.

❑ **Situation de l'offre GMAO à l'aube de l'an 2000**

L'AFIM (association française des ingénieurs et responsables de maintenance) a pris l'initiative de recenser périodiquement les logiciels de maintenance dans un « panorama » du marché et propose des formations à la GMAO.

La prolifération de produits GMAO lors des dernières années entraîne un regroupement des entreprises, cet aspect étant à prendre en compte par les acheteurs (critère de pérennité du produit et de l'entreprise).

Il n'est pas question de détailler l'offre dans cet ouvrage, mais de donner à réfléchir au fait que quelques fournisseurs se partagent 80 % du marché, bien qu'il existe aujourd'hui plusieurs centaines d'outils de GMAO dans le monde ou en France, diffusés par des éditeurs ou des intégrateurs informatiques. Pour le choix d'un logiciel, il était habituel de considérer, outre le produit, la pérennité de l'éditeur ; mais les regroupements, rachats de ces dernières années démontrent qu'il faut prendre également en compte la pérennité de la stratégie commerciale de l'éditeur et l'intérêt que représente pour lui le marché francophone européen. Nous distinguons actuellement les produits informatiques suivants.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– Les GMAO « Industrie », les plus nombreuses.
– Les GMAO « Parc », destinées à la gestion d'une « flotte » de véhicules ou d'engins (environ 150).
– Les GMAO « SAV », destinées à la gestion des services après-vente.
– Les GMAO « Tertiaire », dont une sous-famille est dédiée spécifiquement à la maintenance hospitalière.

À côté de ces GMAO sont proposés des produits logiciels connexes spécialisés comprenant :

– des supervisions, en particulier de type GTC (gestion technique centralisée). Certains modules de GMAO permettent l'interfaçage avec les surpervisions techniques de façon à intégrer les signaux et les mesures ;
– des logiciels de gestion de projets, dont certains sont dédiés spécialement à la gestion des grands arrêts de maintenance ;
– des systèmes experts d'aide au diagnostic et au dépannage ;
– des générateurs d'analyses fonctionnelles et d'AMDEC ;
– des produits d'analyses vibratoires de machines tournantes ou d'images thermiques ;
– des systèmes de saisie par codes à barres.

8.1.5 Les progiciels de GMAO : analyse des différents modules fonctionnels

Tous les progiciels de GMAO ont en commun la même structure modulaire proposant les mêmes fonctions. Mais, selon les logiciels, les fonctions remplies sont diversement dénommées, diversement réparties et diversement organisées. Prenons comme exemple Sirlog, la première GMAO développée en France et dont la composition reste représentative.

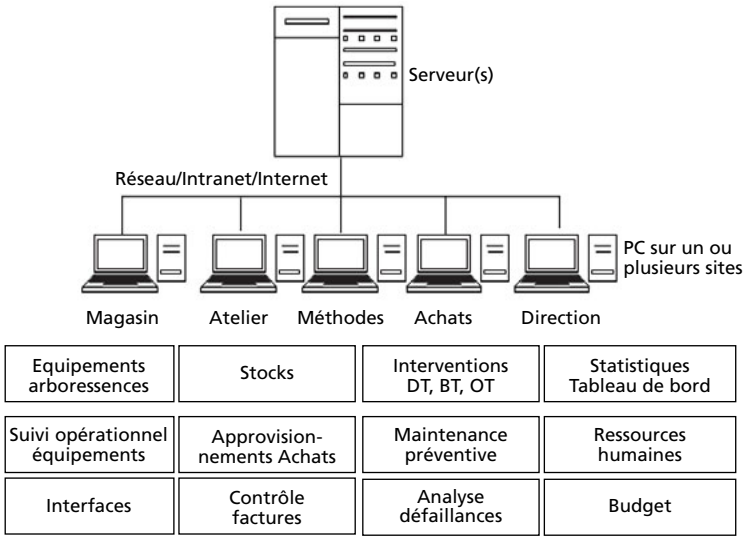


Figure 8.2 – Exemple de structure modulaire d'une GMAO

C'est dans les bureaux techniques (méthodes, ordonnancement, logistique et travaux neufs) que s'effectuera majoritairement la gestion par exploitation des 10 modules analysés. Le « cahier des charges » proposé pour chaque module n'a pas l'ambition d'être exhaustif (chaque service maintenance a ses propres critères), mais d'attirer l'attention sur certains points souvent négligés. Les modules analysés sont les suivants :

1. gestion des équipements ;
2. gestion du suivi opérationnel des équipements ;
3. gestion des interventions en interne et en externe ;
4. gestion du préventif ;
5. gestion des stocks ;
6. gestion des approvisionnements et des achats ;
7. analyses des défaillances ;
8. gestion du budget et suivi des dépenses ;
9. gestion des ressources humaines ;
10. tableaux de bord et statistiques ;
11. autres modules et interfaçages possibles.

❑ 1. Module « gestion des équipements »

Il s'agit de décrire et de coder l'arborescence du découpage allant de l'ensemble du parc à maintenir aux équipements identifiés et caractérisés par leur DTE (dossier technique équipement) et leur historique, puis à leur propre découpage fonctionnel (voir § 3.2 et 3.3). À partir du code propre à l'équipement, le module doit permettre de :

– pouvoir localiser et identifier un sous-ensemble dans l'arborescence ;
– connaître l'indice de criticité fonctionnelle de l'équipement, sa durée d'usage relevé par compteur ;
– accéder rapidement au « plan de maintenance » de l'équipement ;
– pouvoir trouver ses caractéristiques techniques, historiques et commerciales à partir du DTE ;
– pouvoir localiser un ensemble mobile, trouver son DTE et son historique (gestion multisite) ;
– connaître ses consommations en énergie, en lubrifiants, etc. ;
– connaître la liste des rechanges consommés ;
– connaître le code des responsables exploitation et maintenance de l'équipement ;
– accéder aux dessins et schémas relatifs à l'équipement contenus dans un logiciel de gestion documentaire (hors DTE) ;
– lister la nomenclature des pièces détachées.

❑ 2. Module « gestion du suivi opérationnel des équipements »

À travers le module de suivi des performances d'un équipement, il s'agit de retrouver les indicateurs de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et le taux de rendement synthétique *TRS* si la TPM est envisagée ou effective.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Le choix des indicateurs prédétermine la nature des saisies nécessaires. Celles-ci doivent pouvoir se faire « au pied de la machine » et en temps réel, aussi bien en ce qui concerne les demandes que les comptes rendus.

☐ **Dans le cadre d'un suivi technique par l'indicateur Disponibilité**

Le module doit être capable d'assurer la gestion illustrée par la figure 5.48 du paragraphe 5.5.3 en affichant :
– les graphes d'évolution des D_i par périodes de suivi ;
– les graphes de Pareto en *NT* se rattachant aux équipements pénalisants, par nature des arrêts ;
– le rappel des valeurs des indicateurs *n* et *MTA* ou *MTTR* pour les dernières périodes.

☐ **Dans le cadre d'un suivi par le *TRS***

Le module doit être capable, à partir des données opérationnelles liées aux pertes de performances, aux pertes de qualité et aux pertes de disponibilité, de calculer les trois taux et leur produit (le *TRS*) par période, de montrer leur évolution, de présenter l'affichage analytique des valeurs après sélection, pour diagnostic.

De façon plus générale, l'agent des méthodes doit être capable de trouver à travers ce module tous les éléments quantitatifs lui permettant d'approfondir une analyse de logistique, de fiabilité, de maintenabilité ou de disponibilité.

❑ **3. Module « gestion des interventions »**

Nous avons vu en ordonnancement l'existence de plusieurs procédures adaptées à la nature des travaux. Pour les nombreux BPT, pas de demande DT ni d'attribution de numéro, mais un enregistrement rapide a posteriori de leur durée, de leur localisation et de leur nature.

Il est nécessaire de créer une bibliothèque des différents codes utiles afférents aux clients, aux intervenants, aux différents statuts de l'intervention. D'autre part, à chaque équipement doit correspondre une bibliothèque de codes standards, relatifs au découpage de l'équipement, à l'effet déclenchant (souvent appelé par erreur « cause » d'arrêt) et à la cause identifiée.

☐ **Pour les DT, demandes de travaux**

Le module doit permettre :
– la création d'un numéro DT, OT, qui servira de référence pour toutes les opérations liées, procédures de sécurité spécifique, préparation et DA ou BSM par exemple ;
– l'horodatage de la demande, avec identification du demandeur et du secteur (code client) et l'urgence ou le délai attribué ;
– le suivi possible du statut de la demande par le demandeur (code des différents statuts).

☐ **Au niveau de la préparation de l'OT**

Le module doit permettre :
– l'insertion de gammes de maintenance préétablies ;

– les réservations d'outillages, de moyens spéciaux, de pièces de rechanges, etc. ;
– l'affectation des ressources ;
– le regroupement de la gamme de maintenance avec des plans, des pictogrammes et des schémas extraits d'un logiciel de gestion documentaire ;
– l'insertion automatique de procédures de sécurité liées à certains secteurs ou à certains équipements ;
– l'intégration d'un groupe de travaux à un gestionnaire de projet, avec graphismes Gantt et PERT.

☐ **Pour les comptes rendus d'intervention**

Le module doit permettre :
– la saisie « *facile et rapide* » (critère très important) des paramètres et de la caractérisation de l'intervention, même et surtout s'il s'agit d'une correction de microdéfaillance ;
– de caractériser l'intervention par les codes de la bibliothèque de l'équipement (localisation, cause, etc.) ;
– l'imputation des travaux à des comptes analytiques ;
– de distinguer les durées d'intervention (→ *MTTR*) des durées d'indisponibilité (→ *MTI*) ;
– d'enrichir chronologiquement l'historique de l'équipement dès la clôture de l'OT ;
– de connaître les consommations de pièces utilisées, éventuellement leurs valeurs ;
– la rédaction d'un texte libre contenant les remarques et les suggestions de l'intervenant.

Par contre, il ne doit pas donner l'impression d'une « inquisition », mais d'un besoin de savoir pour mieux comprendre et améliorer avec l'aide du technicien d'intervention.

☐ **Pour la gestion des travaux externalisés**

Le module doit permettre une gestion semblable aux procédures de préparation et d'ordonnancement internes :
– émission de DTE (demande de travaux externalisés) pour les prestations ponctuelles ;
– création de contrats-type (clauses techniques, économiques et techniques, plan de sécurité) qu'il suffit d'adapter à chaque commande.

❑ **4. Module « gestion du préventif »**

Le module permettra de gérer la maintenance systématique à travers un planning calendaire par équipement, les dates étant prédéterminées ou déterminées à partir d'un relevé de compteur (ou d'une mesure dans le cas de la maintenance conditionnelle). Le déclenchement sera automatique, par listing hebdomadaire des opérations prévues dans la semaine. Chaque opération sera définie par sa gamme préventive.

Le module devra aussi permettre un déclenchement « manuel d'opportunité », par exemple par anticipation d'une opération préventive à la suite d'un arrêt fortuit.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ 5. Module « gestion des stocks »

Le système repose sur le « fichier des articles » en magasin comprenant les « lots de maintenance » par équipement et sur les mouvements entrées/sorties du magasin. Une fiche article doit comprendre :

– le code article défini par l'organisation interne, son libellé et sa désignation technique ;
– le code article du ou des fournisseurs et le code fournisseur (+ fabricant éventuellement) ;
– le code du gisement en magasin ;
– les codes des articles de substitution, en cas de rupture ;
– le rattachement aux équipements possédant cet article ;
– le prix unitaire et le prix moyen pondéré automatiquement calculé ;
– les quantités en stock, commandées en attente ;
– la méthode de réapprovisionnement et ses paramètres (stock de sécurité, stock maxi, etc.) ;
– les dates des derniers mouvements ;
– l'historique des consommations.

Les outils d'analyse du stock en nature et en valeurs :

– classement des articles en magasin par valeurs et par taux de rotation ;
– la valeur des stocks par nature et par périodes (mois par mois) ;
– la liste des articles « dormants » ;
– la liste des cas de ruptures de stock (demandes non satisfaites).

Il importe de vérifier certaines potentialités du module :

– la possibilité ou non d'actualisation automatique des paramètres en fonction des consommations ;
– la possibilité d'avoir le profil des consommations et le tracé de la courbe ABC en valeurs ;
– les possibilités relatives aux transactions du magasin : réceptions provisoires ou définitives, retours au fournisseur en cas de non-conformité (avec l'écran de la commande), etc. ;
– l'édition de pièces réservées sur une préparation (numéro d'OT pour l'imputation) ;
– la présence d'un écran d'inventaire comprenant les différents critères d'article ;
– la possibilité d'effectuer des recherches et des analyses multicritères.

❑ 6. Module « gestion des approvisionnements et des achats »

Caractéristiques de la fonction en maintenance : beaucoup de références et de fournisseurs pour des quantités faibles et des délais courts. Ce module doit permettre, en interface avec le logiciel du service « achat » :

– le fichier des fournisseurs et des fabricants avec leurs tarifs liés aux quantités ;
– le lancement d'appels d'offre aux fournisseurs ;
– l'édition de bons de commandes standard ou personnalisés, et le suivi des autorisations de dépenses ;

– le contrôle des factures ;
– l'édition automatique des codifications internes et fournisseurs (transcodage) ;
– le suivi des états de la commande ;
– le suivi des réceptions totales, partielles et des refus ;
– l'estimation de la qualité des fournisseurs par les contrôles de réception et le suivi des délais ;
– l'édition automatique de lettres de relance pour les retards.

❑ 7. Module « analyses des défaillances »

La base de ce module est constituée des historiques automatiquement alimentés par chaque saisie de BPT et d'OT mis en famille par ses codes d'imputation. À partir d'un équipement donné, il doit permettre :

– l'établissement des analyses quantitatives par graphes de Pareto, avec plusieurs critères (*TTR*, T_A) et plusieurs mises en familles (par cause, par localisation, par nature de défaillance, etc.) et sur plusieurs périodes d'analyse (hier, la semaine écoulée, les trois derniers mois, l'année, etc.) ;
– puis l'analyse qualitative des défaillances sélectionnées comme prioritaires, éventuellement mise sous forme AMDEC.

La productivité de l'analyse de défaillance comme outil de progrès rend cette fonction de GMAO stratégique : il est indispensable de savoir par qui, quand, comment vont être organisées ces analyses pour tester l'adéquation du logiciel au cahier des charges du module. Ce module est la base de la MBF (maintenance basée sur la fiabilité).

❑ 8. Module « budget et le suivi des dépenses »

La gestion analytique ne permet que des « macroanalyses » des comptes. Un découpage plus fin de la fonction maintenance doit donc pouvoir permettre des analyses détaillées grâce à la GMAO, l'objectif étant le suivi de l'évolution des dépenses par activité dans un budget donné. Quelques éléments du cahier des charges à préciser, c'est-à-dire le module permet-il :

– la création d'un nouveau budget en modifiant des chapitres de l'ancien ?
– la comparaison entre plusieurs exercices ?
– la prise en compte des frais généraux du service ?
– l'éclatement en coûts directs et indirects (pertes de qualité, de production, etc.) ?
– la ventilation des coûts par équipement, par « client », par type d'activité de maintenance, par origine de défaillance, par sous-ensemble « fragile » communs à plusieurs équipements, etc. ?
– la comparaison entre la prévision et la réalisation ?
– la gestion en plusieurs devises : francs, euros, dollars, etc. ?
– la possibilité d'exporter les résultats comptables sur un logiciel de comptabilité ?
– la décomposition structurelle du budget en sous-budgets consolidables ?
– le suivi des coûts pour établir le *LCC* (coût du cycle de vie) d'un équipement ?

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ 9. Module « gestion des ressources humaines »

Spécifiquement adapté au service maintenance, ce module sera principalement une aide à l'ordonnancement. Il sera construit autour d'un « fichier-technicien » pouvant comprendre, pour chacun :

– la qualification, les habilitations, les diplômes, l'ancienneté dans son échelon actuel, les différentes affectations, l'affectation actuelle, etc. ;
– les formations suivies, demandées et le bilan de compétence ;
– les congés pris, demandés et les récupérations (données nécessaires à la programmation des travaux) ;
– les temps de présence et d'absence (historique des arrêts de travail) ;
– les coûts horaires pour chaque qualification (pour imputation des coûts d'intervention).

Remarquons l'intérêt, pour chaque technicien, de pouvoir accéder par la GMAO, à partir du terminal atelier, à ses propres informations relatives aux reliquats des congés à prendre ou à des informations générales de l'entreprise. C'est un facteur d'acceptation du système informatique.

❑ 10. Module « tableaux de bord et statistiques »

Les tableaux de bord concernent la mise en forme de tous les indicateurs *techniques, économiques et sociaux* sélectionnés pour assurer la gestion et le management du service maintenance. Certains sont livrés en « standard » avec le logiciel. Il faut vérifier s'ils peuvent être personnalisés rapidement (courbes, graphiques et autres visuels), ou développés avec un générateur d'état extérieur au logiciel. Vérifier également que l'extraction de données se fait simplement.

En cas de projet TPM, il faut vérifier la possibilité de former l'indicateur *TRS* et de visualiser ses variations par périodes.

❑ 11. Modules complémentaires ou interfaçages utiles

La revue des besoins internes et externes du service peut amener à rechercher des extensions par interfaçage, par acquisition de modules complémentaires ou par développement de logiciels applicatifs spécifiques. Interfaçage requis ou non avec :

– le logiciel de comptabilité et de paie,
– le logiciel de gestion des ressources humaines,
– le logiciel de gestion des achats et approvisionnements,
– la GPAO, la GTC, les réseaux techniques,
– le logiciel de gestion documentaire (GED),
– les outils multimédia,
– la supervision : saisie automatique de données « machines » par collecteur portable, par code barres, par automates ou par capteurs.

Autres fonctionnalités possibles :

– liaison avec le logiciel de gestion de projet,
– lecteur de badges,

– saisie des images : scanner, hypertexte, etc.,
– analyses de pannes, génération d'AMDEC, etc.

Toutes ces potentialités étant très évolutives, il importe de ne pas prendre de retard au départ d'un projet GMAO, qui doit déboucher sur une durée d'exploitation significative pour se justifier économiquement, sans pour cela aller au superflu.

8.1.6 Le choix d'un outil GMAO bien adapté

Il appartient à chaque service maintenance de déterminer ses besoins internes en matière d'informatisation, mais également ses besoins de communication externes, présents et à venir. Cette réflexion doit se faire dans la cohérence du programme d'informatisation de l'entreprise, à l'horizon 5 à 8 ans, en pensant que si 35 % seulement des potentialités d'une GMAO sont exploitées (surestimation des besoins), l'exploitation de certaines GMAO doit être abandonnée, par sous-estimation des besoins, souvent faute d'être compatibles avec les nouvelles organisations de l'entreprise. Le choix d'un outil GMAO passe par son adéquation :

– à la stratégie globale du système informatique de l'entreprise → problème de l'intégration ;
– aux besoins exprimés du service maintenance : problème du cahier des charges et problème du paramétrage (personnalisation).

❑ Intégration de la GMAO dans le système d'information de l'entreprise

La réduction de l'hétérogénéité des matériels, des langages et des systèmes d'exploitation, la suppression des redondances et les doubles saisies passent par l'intégration de la GMAO à la cohérence d'un système informatique global. Trois types d'intégration sont possibles :

– Installation d'un logiciel GMAO complet dont l'interfaçage se limite à un échange de mouvements avec le logiciel de comptabilité. Cette intégration est la plus rapide à réaliser et la plus sûre même si il y a redondance apparente de certains logiciels (stocks et achats pour la production et la maintenance). Une analyse fine des logiciels montre que la GMAO est plus exigeante en fonctionnalités des stocks et achats que ceux de la GPAO.
– Installation d'un module GMAO propre à un ERP (Enterprise Ressources Planning) qui est un logiciel complet de gestion et dont les modules achats et stocks sont communs à la production et à la maintenance. Cette solution demande en fait de longs et coûteux paramétrages pour donner une satisfaction souvent mitigée.
– Assemblage de divers logiciels : partie travaux de la GMAO, logiciels stocks, achats différents et interfacés, cette intégration est souvent décevante suite à la sous-estimation de la complexité des interfaces à réaliser

❑ Importance du paramétrage : la « flexibilité » d'une GMAO

L'outil GMAO doit proposer des propriétés de modules et un paramétrage pour pouvoir s'adapter à l'entreprise, à son organisation, à son évolution prévisible et à son vocabulaire. Et non l'inverse ! L'aspect paramétrage des produits GMAO s'impose, permettant à l'utilisateur de modeler ses interfaces au logiciel suivant ses besoins

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

propres. Une gestion de configuration doit permettre des ajouts ou des suppressions de champs, des calculs sur les champs et des modifications de libellés. La GMAO doit permettre une extraction rapide de données permettant de personnaliser des indicateurs.

Une partie importante des outils de paramétrage est celle qui concerne le jalonnement ou *workflow*. Si vous envisagez une organisation basée sur le respect de procédures décrite uniquement sous forme orale ou papier, le problème ne se pose pas. Le logiciel n'est pas structurant.

Par contre, si vous souhaitez que le logiciel impose une manière de travailler selon ces procédures, il faudra jalonner son utilisation par des statuts d'état (en préparation, à valider, validé…). Ces statuts pourront être modifiés selon une matrice d'autorisation. Par exemple seul le responsable peut clôturer un OT ou encore valider une demande d'achats.

Un autre aspect important est la possibilité de gérer plusieurs sites avec paramétrage des échanges de données entre ces sites.

❑ Importance du cahier des charges

Les fournisseurs de GMAO, en 1998, estimaient qu'une moyenne de 35 % seulement des potentialités des GMAO vendues sont exploitées : ce qui peut poser le problème de l'adéquation de l'offre et de la demande, mais plus sûrement le problème de la définition précise des besoins au moyen d'un bon cahier des charges. La lecture du paragraphe 8.1.5 précédent peut permettre « une revue de critères » à l'appui de la démarche interne de rédaction d'un cahier des charges, préalable indispensable à l'acquisition d'une GMAO et à son acceptation par les acteurs de son exploitation…

Il apparaît que l'acquisition courante de « petits logiciels » est en fait une solution d'attente, « de crainte de se tromper », faute de lisibilité suffisante de l'avenir de l'entreprise et du service, de l'évolution du marché et des produits, faute de cahier des charges suffisant et faute de préparation des acteurs.

8.1.7 La conduite d'un projet GMAO

❑ Importance de l'aspect humain dans la réussite du projet

Le projet GMAO est pour le service maintenance un projet « structurant » remettant en cause des habitudes de travail, donc susceptible de modifier en profondeur l'état d'esprit et la motivation des acteurs. C'est une opportunité pour réorganiser un secteur, pour optimiser des procédures, pour élever le niveau de sensibilité à la gestion de tous les acteurs, pour en promouvoir certains.

Il ne faut pas négliger ni sous-estimer le poids de la formation dans le coût du projet : *l'acceptation de l'outil* est la condition incontournable de réussite du projet, son refus la cause majoritaire d'échec. Or il ne peut y avoir d'acceptation sans une stratégie de formation adaptée au niveau de départ des techniciens.

❑ Étapes du projet

Elles seront différentes suivant que le projet est « intégré » à un programme informatique conduit au niveau de l'entreprise, ou qu'il est « autonome » car conduit au niveau du seul service maintenance. Dans ce cas, la maintenance aura davantage de liberté, mais aussi le poids de la maîtrise du projet. Nous nous placerons dans ce cas, qui implique la nomination d'un chef de projet interne, détaché à plein temps pendant une période voisine d'une année suivant l'ambition du projet.

Les étapes seront également différentes suivant qu'il s'agit de « démarrer » une première GMAO ou de renouveler une ancienne GMAO, ce qui pose dans ce cas le problème de récupération des données et du « basculement » de l'ancienne sur la nouvelle.

□ Préalables

Dans tous les cas, comme pour tout projet d'ailleurs, une forte implication de la direction est indispensable. Elle se manifestera par un plan de communication interne, la rédaction de directives encadrant le projet, dont le partage entre les ressources internes et externes allouées. La nomination du chef de projet entouré à temps partiel d'un groupe de pilotage et l'affectation de moyens (salle de travail équipée en informatique) sont indispensables.

D'autre part, rappelons que le miracle assisté par ordinateur n'aura pas lieu : une GMAO n'est qu'un outil, certes structurant, mais incapable d'organiser un service. L'implantation ne peut se réussir qu'à partir d'une organisation ayant fait auparavant la preuve de son efficacité. C'est à partir de cette organisation existante que seront étudiés les éléments du cahier des charges.

□ Étude de faisabilité

Elle passe par le dimensionnement du projet en termes de ressources matérielles, humaines et financières, menée si nécessaire avec l'aide d'un consultant expérimenté en GMAO.

L'étude de faisabilité doit surtout s'appuyer sur un audit du type proposé dans (ADE 94), visant à établir une photographie de la fonction maintenance « à l'origine », à identifier ses points faibles et en déduire si le projet d'informatisation est pertinent. L'audit peut se matérialiser par un « graphe en radar » donnant l'image de l'organisation de départ, et les axes sur lesquels la GMAO doit apporter des « plus », suivant l'exemple ci-après.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

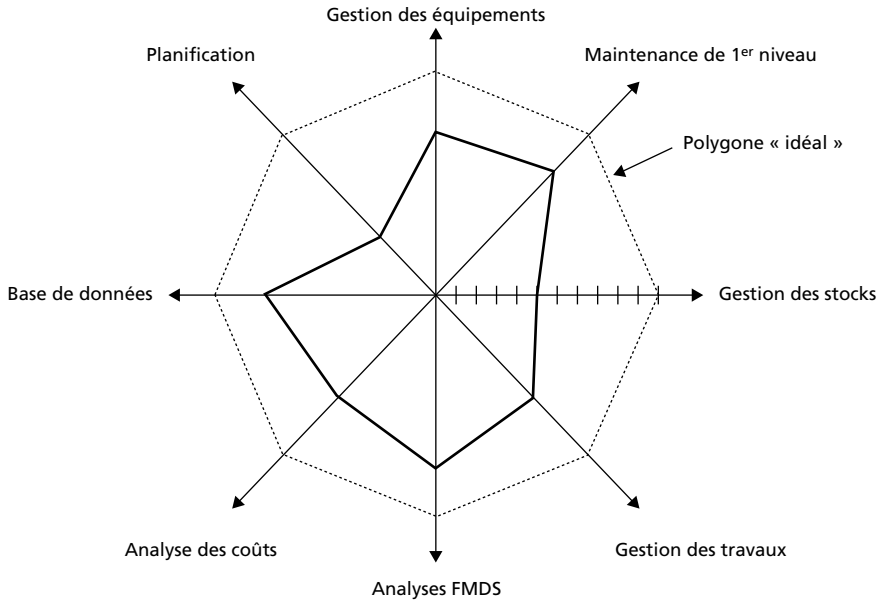


Figure 8.3 – Image de la fonction maintenance (d'après ADE 94)

Dans le profil du cas présenté, une réorganisation préalable à la prise en charge informatique de la gestion des stocks et de la planification des travaux s'avère indispensable. La GMAO devra être un vecteur de progrès pour les autres axes, ce qui sera vérifiable en refaisant l'autodiagnostic en cours de projet, puis à la fin.

☐ **Rédaction du cahier des charges de consultation**

Il ne suffit pas d'établir un cahier des charges technique et gestionnaire de la fonction (voir la liste des modules et de leurs propriétés), mais de prendre en compte des critères :

– d'intégration immédiate et à moyen terme dans l'informatique de l'entreprise ;
– de qualité du conseil, du service client et de l'assistance ;
– de pérennité du fournisseur et du produit ;
– de transferts de compétence vendeur → client, installateur → utilisateur pour une autonomie rapide ;
– de formation : plan de formation quantitatif et qualitatif ;
– d'évolution, d'interfaçage et de paramétrage ;
– de convivialité et d'ergonomie ;
– d'implantation (exemple d'une borne tactile en libre service à proximité des dépanneurs).

L'idée du « juste nécessaire » doit éviter d'investir dans des fonctions inutiles, inadaptées, superflues et coûteuses. L'expérience montre qu'il vaut mieux chercher à dégonfler l'enveloppe budgétaire par cette recherche du juste nécessaire que sur la formation et l'assistance !

☐ Choix de l'outil GMAO et des modules nécessaires

La sélection du logiciel doit suivre un certain formalisme pour être efficace. Cela ne sert à rien d'assister à des démonstrations non préparées. Pour une sélection rationnelle, il est conseillé de suivre le déroulement suivant.

Rédaction et envoi du CCDC, de l'appel d'offres, dépouillement des réponses.

Présélection des éditeurs selon trois aspects analysés successivement :

– Techniques informatiques : SGBD, OS, architecture (Web, Client/serveur, autre…). **Remarque :** Certains aspects sont éliminatoires et interdisent l'analyse de la phase suivante.

– Organiques : conception du logiciel, fonctions de paramétrages nécessaires pour personnaliser le logiciel selon le CDC. **Remarque :** Certains aspects sont éliminatoires et interdisent l'analyse de la phase suivante.

– Fonctionnelles : analyse des fonctions GMAO offertes.

Rédaction et envoi d'un scénario de démonstration aux trois éditeurs présélectionnés. Ce scénario est en général issu des procédures à la base du CDC.

Démonstration structurée

La conduite de la démonstration est menée de préférence par un consultant expérimenté. Le meneur veille au suivi du scénario et n'hésite pas à faire recommencer pour approfondissement une phase de la démonstration.

La démonstration est ensuite évaluée par un comité d'observateurs selon une grille d'évaluation.

Elle est suivie par un débriefing, puis par la comptabilisation de l'évaluation.

☐ Implantation, plan de formation et démarrage

L'implantation suit en général le déroulement suivant.

Installations :

– Surveillance et validation de l'installation des réseaux, du SGBD et du logiciel.

– Vérification du fonctionnement du logiciel.

– Recette d'installation.

Paramétrage :

– Organisation et formation du groupe de projet.

– Paramétrage réalisé par l'éditeur selon les procédures et le CDC.

– Réalisation d'une maquette par l'éditeur.

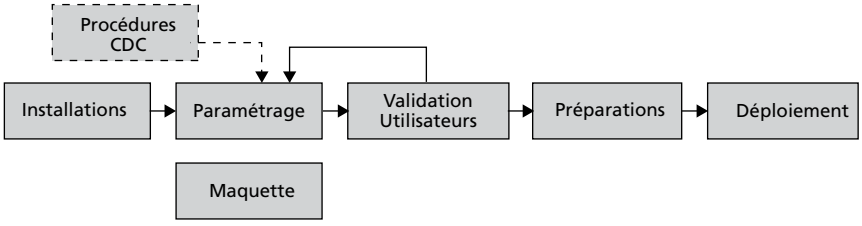
– Validation de la maquette en une ou plusieurs séances jusqu'à obtention d'un consensus des représentants des utilisateurs.

– Recette du paramétrage.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Préparations :
– Organisation de la collecte des données (équipements, sous-ensembles, localisations, réseaux hydrauliques, personnel…), import de ces données par l'éditeur.
– Rédaction des manuels utilisateurs selon les personnalisations et les procédures décrites précédemment.
– Test général de la base de données prête à l'utilisation.
– Suivi et recette du déploiement du matériel et du logiciel
– Recette des préparations.

Déploiement :
– Formation des utilisateurs faite par l'éditeur juste avant le lancement.
– Cette formation se fait devant un PC à 2 personnes maximum par PC.
– Assistance aux utilisateurs lors du lancement du projet.



❑ Quelques causes d'échec

Toutes les données récentes émanant des fournisseurs comme des utilisateurs de GMAO convergent : le taux d'échec total ou partiel de l'implantation d'une GMAO est élevé, puisque plus de 50 % des projets avortent. Certains ne remplissent pas les fonctions prévues, d'autres entraînent des dépassements considérables de budget.

Ce taux d'échec doit donner à réfléchir, concernant un outil stratégique et incontournable. Listons quelques causes qu'il vaut mieux identifier pour mieux les contourner.

□ Insuffisance de la prise en compte des facteurs humains

N'ayons aucune illusion : l'implantation d'une GMAO aura ses détracteurs a priori. Et ils seront d'autant plus nombreux que le projet sera imposé. D'où la nécessité d'un plan de communication précédant un plan de formation pour éviter une dynamique de rejet.

□ Insuffisance de l'organisation initiale

Nous avons déjà vu que l'objectif de l'implantation d'une GMAO n'est pas de mettre de l'ordre : il faut savoir que là où la technicité est insuffisante, là où l'organisation est inefficace et là où le climat social est dégradé, l'implantation est vouée à l'échec, et que le remède GMAO sera pire que le mal initial ! Un regard extérieur et un audit de la fonction doivent pouvoir dissuader de se lancer dans l'aventure.

☐ **Seuls les aspects informatiques et financiers sont pris en compte**

C'est souvent le cas des modules GMAO de logiciels intégrés (SAP, JD Edward, Oracle Application...). Ces modules présentent des avantages certains de cohérence informatique mais nécessitent d'importants paramétrages et très souvent des développements spécifiques, lesquels sont souvent sous estimés donc incomplets et déçoivent les utilisateurs.

☐ **Le logiciel est trop complexe**

À force de vouloir ajouter des fonctions destinées à rassembler une plus grande diversité de clients, les éditeurs ont créé des écrans avec un nombre élevé de champs dont très peu sont utiles à l'utilisateur.qui s'y perd. Dans un logiciel parfaitement adapté, 10 minutes de formation suffisent pour savoir effectuer un compte rendu de panne lequel ne nécessite que 1 à 5 minutes au maximum.

☐ **Le projet est mal piloté, il y a confusion et absence d'objectifs clairs**

Les objectifs du projet doivent être clairement identifiés par tous. Si l'opération est mal préparée, si, au nom du consensus, tout le monde veut développer son idée, alors la cohérence sera perdue. Rappelons que ce projet n'est jamais une fin en soi, mais seulement un outil au service d'un projet global d'amélioration de l'efficacité de la maintenance.

☐ **Le projet est vu sous son seul aspect technique**

Lorsque les acteurs, et spécialement l'encadrement, ne sont pas suffisamment sensibilisés à la gestion économique, l'utilisation de l'outil risque de dériver vers la seule maîtrise technique des événements, qui ne permettra pas un bon retour sur investissement, la réduction des coûts de maintenance étant un des éléments clés du projet.

☐ **Les difficultés de démarrage et de formation sont sous-évaluées**

Les vendeurs de GMAO, pour des raisons commerciales, ont parfois tendance à sous-estimer les difficultés, les temps et les coûts de démarrage et de formation.

☐ **Le « juste nécessaire » est surévalué**

Lorsque les conditions d'une sympathique dynamique collective sont créées, l'expression des besoins de chacun amène naturellement à une surabondance de demandes qu'il faudra tempérer par un arbitrage dans le respect de l'enveloppe allouée.

☐ **L'exploitation de la GMAO est insuffisante…**

Lorsque le système de gestion est opérationnel, il est mis à la disposition des « hommes de l'art ». Encore faut-il que ces derniers sachent mettre l'outil à disposition de l'optimisation de la fonction maintenance. Car n'oublions pas, pour conclure, que *la seule justification de l'investissement GMAO est l'analyse pertinente des données aux fins de propositions d'amélioration permanente de la maintenance.*

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

8.2 Le tableau de bord de gestion : ratios et indicateurs

« Peut-il y avoir un vent favorable pour le marin qui ne sait où il est, ni vers quel port se diriger… » (Sénèque).

8.2.1 Gérer la maintenance à partir d'un tableau de bord

❑ La gestion itérative : une démarche de progrès permanent

□ Principe : le tableau de bord est un outil de pilotage du changement

Appliquée à la maintenance, l'utilisation d'un tableau de bord permet de conduire vers une disponibilité maîtrisée des équipements et/ou vers une réduction des coûts par la connaissance des événements et des activités du service.

Ces événements et activités étant paramétrés et mesurés à un instant T_a, le tableau de bord doit permettre au responsable d'effectuer l'analyse de la situation à T_a, d'en déduire des axes d'action puis de vérifier à T_b s'ils ont été efficaces ou non.

Le tableau de bord est donc *un outil d'aide à l'analyse objective des résultats obtenus* dans la situation de la période T_a pour cibler des objectifs à atteindre à l'horizon T_b. Puis pour vérifier à l'instant T_b si ces résultats ont été atteints, ou non. Ces résultats sont mis sous forme d'*indicateurs* facilitant l'analyse et l'interprétation.

□ Mise en forme des indicateurs

La mise en forme des indicateurs nécessaires à décrire une situation doit faciliter la réflexion du décideur. Les indicateurs doivent donc être :

– globalisés, pour synthétiser la masse des informations saisies, puis sélectionnées ;
– peu nombreux, mais descriptifs d'une fonction à piloter ;
– simples, visuels, clairs pour être facilement compréhensibles et interprétables ;
– objectifs, pour donner une image incontestable d'une situation ;
– structurés suivant l'objectif à atteindre ;
– sélectionnés : trop d'informations nuisent à l'analyse, pas assez ne permet pas une description complète de la situation ;
– établis sur une période de référence identifiée et significative.

❑ Les différentes formes possibles d'indicateurs

□ Valeurs mesurées et outils graphiques

Regardons un tableau de bord de voiture : des indicateurs numériques (alarme d'usure des plaquettes) côtoient des indicateurs analogiques (la fréquence de rotation du moteur).

Une indication numérique 0/1 (lampe témoin) convient à la description d'un état (une alarme, un seuil) mais non à une analyse de situation.

N'importe quelle valeur mesurée analogique est une indication de situation : $p = 6{,}3$ bars par exemple. Elle devient plus intéressante à interpréter dès lors qu'elle permet une réflexion tirée d'une dérive par rapport à une signature de référence (p normale = 6 bars) ou une évolution temporelle mise en évidence par un graphe.

Le phénomène « la pression croît » mérite un diagnostic suivi de mesures correctives. Autrement dit, l'indicateur analogique « *valeur mesurée* » n'a pas une grande signification en valeur absolue, mais devient intéressant exprimé en valeur relative :

– sous forme de pourcentage (c'est l'intérêt de la loi de Pareto),
– sous forme de moyenne (par traitement statistique ou probabiliste),
– par comparaison à une référence (dérive) ou à une norme,
– par comparaison à lui-même dans le temps (évolution),
– par comparaison à d'autres indicateurs de nature semblable.

D'où l'intérêt d'utiliser les outils « visuels » de la statistique descriptive (figure 8.4) pour traiter un échantillon de N valeurs, de préférence aux tableaux de valeurs moins faciles à interpréter.

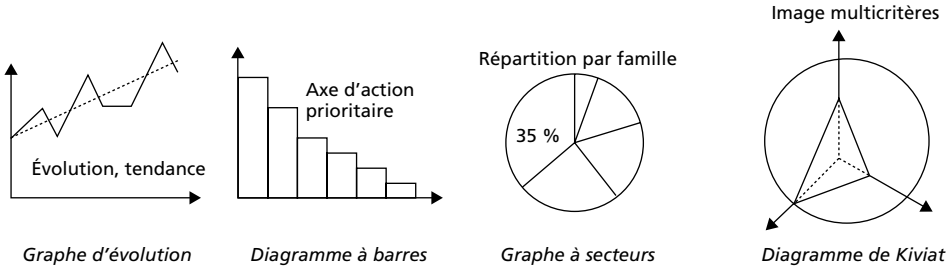


Figure 8.4 – Quelques outils d'animation de tableau de bord

☐ Ratios

C'est le rapport conventionnel de deux grandeurs sans lien direct, mais ayant une force d'évocation facilitant la réflexion et les comparaisons. Par exemple :

$$\frac{\text{coût de la maintenance}}{\text{effectif de la production}} = 4{,}6\ \text{k€/personne}$$

$$\frac{\text{coût de la maintenance}}{\text{tonne de papier produite}} = 27{,}5\ \text{k€/personne}$$

☐ Qualités d'un indicateur

– *La pertinence :* l'indicateur a pour objet la prise de décision en connaissance de cause. La pertinence permet l'interprétation facile du phénomène étudié et la prise d'une décision efficace.
– *La fidélité :* l'indicateur doit renvoyer une image sans distorsion du phénomène.
– *La justesse et la stabilité :* l'indicateur doit donner une image exacte (centrée) et stable (renouvelable, répétitive).
– *La précision, la sensibilité :* les variations significatives du phénomène doivent être reflétées par des variations lisibles de l'indicateur.
– *La consolidation :* il peut être utile afin de réaliser des synthèses ou des analyses, d'agréger, ou de cumuler, ou de consolider des indicateurs quantifiés.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– *L'aide à la communication :* lorsque plusieurs populations de préoccupations différentes sont intéressées à l'interprétation d'un indicateur, celui-ci doit faciliter le dialogue.

❑ Architecture du système d'information en maintenance

Chacun des trois niveaux de responsabilité opérationnelle de la maintenance doit pouvoir bénéficier du tableau de bord le concernant.

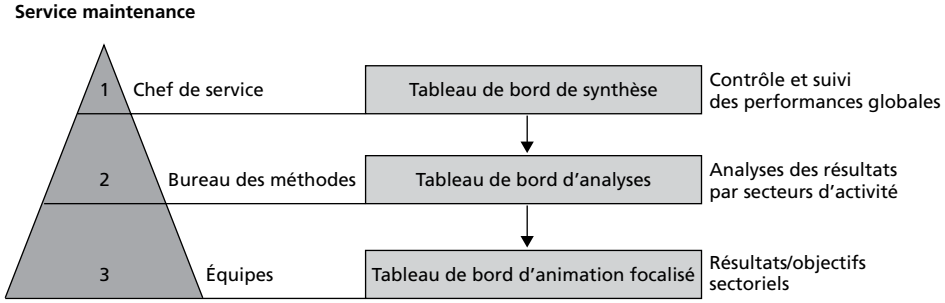


Figure 8.5 – Hiérarchisation des tableaux de bord

L'informatique organisée autour d'une base de données doit permettre :

– la communication verticale entre les trois niveaux et horizontale entre les différentes fonctions ;

– la possibilité de « zoom » (focalisation possible de haut en bas) ;

– la possibilité de globalisation à partir des mêmes données (arborescence d'indicateurs) ;

– la comparaison de la situation actuelle à celles des périodes antérieures ;

– la comparaison des résultats périodiques avec les objectifs fixés ;

– l'extrapolation temporelle de résultats successifs en guise de prévisions.

☐ Tableaux de bord par niveaux

Niveau 1. Le tableau de bord du responsable de service sera élaboré pour une consultation mensuelle et pour un bilan annuel, à partir de ratios à dominante économique (suivi budgétaire). Avec possibilité de focalisation sur les anomalies et dérives constatées afin de fixer des objectifs de progrès.

Niveau 2. Le tableau de bord des services, et du bureau des méthodes en particulier, devra permettre l'analyse fine des problèmes sectoriels afin de définir et de programmer les axes d'action d'amélioration.

Niveau 3. Le tableau de bord de l'équipe doit visualiser les performances de l'équipement en responsabilité (qualité, disponibilité) et les résultats de l'équipe par rapport aux objectifs fixés, dans une démarche participative : l'équipe est un vecteur majeur d'améliorations. Le technicien est responsable de ses saisies : il en voit l'exploitation en retour.

Dans le cadre d'un management participatif à délégation extrême, « *l'autogestion* » d'un secteur sera rendue possible par un tableau de bord de pilotage exploité par l'équipe sectorielle.

Remarque

À un indicateur de niveau 1 (exemple : taux d'indisponibilité I) peuvent correspondre deux indicateurs différents de niveau 2 (exemple : *n* petites pannes répétitives ou une seule panne durable), orientant l'action améliorative vers deux cibles différentes.

☐ **Indicateurs permanents de gestion et indicateurs spécifiques**

Nous distinguerons :

– *les indicateurs permanents*, se rapportant aux activités habituelles et intégrant les trois niveaux constituant le tableau de bord de la gestion du service maintenance ;
– *les indicateurs d'animation de projet*, visant au suivi de l'avancement (les étapes du projet) et à la motivation des acteurs par la visualisation des résultats obtenus et à atteindre. Exemple : la réorganisation d'un magasin ;
– *les indicateurs d'axes de progrès*, de caractère temporaire car associés à un effort collectif ciblé. Exemple : campagne de lutte contre le gaspillage d'eau dans une entreprise agroalimentaire. Un audit interne peut ainsi nécessiter la définition d'indicateurs « occasionnels » ;
– *les indicateurs spécifiques* au suivi d'une fonction particulière. Exemple : la gestion des énergies et/ou la gestion d'un projet d'économie d'énergie.

8.2.2 Construire son tableau de bord de gestion

Bien que l'AFNOR ait proposé une normalisation de ratios généraux (destinés à une comparaison « externe » des performances internes), il appartient à chaque entreprise de définir ses propres indicateurs de performances, adaptés à ses besoins identifiés. Notons cependant l'intérêt de la normalisation aux fins de benchmarking.

Il n'existe pas de bon tableau de bord « clé en main », ce qui n'exclut pas, bien au contraire, d'utiliser le module « tableau de bord » d'une GMAO après avoir vérifié la compatibilité du module avec ses propres besoins (et non l'inverse !).

La démarche d'analyse préliminaire des fonctionnalités d'une GMAO peut servir de canevas à l'élaboration d'un tableau de bord. En effet :

– pour chaque module fonctionnel de la GMAO, il faut définir un cahier des charges ;
– à chaque fonction du service maintenance (correspondant à un module fonctionnel) il faut associer un ou plusieurs indicateurs de performance, sélectionnés suivant leur pertinence (tableau de bord).

❑ **Exemple de constitution d'un tableau de bord de niveau 1**

Nous proposons la construction arborescente d'un tableau de bord de synthèse à 9 indicateurs, destiné à *caractériser les performances du service maintenance* (d'après LAV 92). Dégageons les trois critères principaux.

1. Les coûts de maintenance.
2. Les performances des équipements.
3. L'efficacité du service maintenance.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

À chaque critère principal nous associons trois critères caractéristiques et nous imaginons l'indicateur correspondant, simple (obtenu à partir de données disponibles et non ambiguës) et pertinent.

□ 1. Coûts de maintenance

Le budget de la maintenance est-il bien dimensionné et bien utilisé ?

1.1 Importance économique de la maintenance

Coût de la maintenance/Valeur des immobilisations brutes actualisées

Ce ratio (ordre de grandeur 4 à 5 %) mesure le poids de la maintenance par rapport au capital à maintenir.

1.2 Impact économique de la maintenance

Coût de la maintenance/Chiffre d'affaires

Cet indicateur caractérise le « poids » de la maintenance dans une tonne de fonte ou 1 heure de vol d'avion.

1.3 Implication économique de la maintenance

Coût de la maintenance/Valeur ajoutée produite

Ordre de grandeur de 6 à 12 %.

□ 2. Performances des équipements

Mesure des résultats des prestations de la maintenance par rapport aux attentes des « clients » internes et externes.

2.1 Disponibilité des équipements

De nombreux indicateurs FMD sont possibles (voir § 5.1.2). Par exemple :

$$D = \Sigma\, T_I/T_O$$

ou très simplement le taux de défaillance λ en pannes/heures.

2.2 Pertes de production

Coût de la maintenance/Coût de défaillance

Ce ratio de criticité économique est délicat à mesurer, à cause des coûts indirects (§ 6.3.3) qu'il est cependant nécessaire d'estimer.

2.3 Taux d'insatisfaction des clients

À évaluer par un indice prenant en compte les DT en souffrance, les délais non tenus, la non-qualité des interventions, etc.

□ 3. L'efficacité du service maintenance

Mesure l'efficacité « interne » des équipes et de l'organisation en place.

3.1 Part de dépannage par rapport à l'activité globale

Heures de dépannage/Heure totale d'activité

Ce ratio, inférieur à 30 % dans de nombreux secteurs, est la mesure indirecte de la part ou de l'efficacité du préventif.

3.2 Productivité du personnel maintenance

Temps effectif de travail/Temps de présence

Ce ratio mesure la qualité de la logistique et de l'organisation (gaspillages de temps en déplacements, en attente, en recherche des moyens nécessaires, etc.)

3.3 Réactivité : délai de réponse aux DT

Délai moyen

Il mesure la qualité de l'ordonnancement pour les travaux lourds et la réactivité de l'organisation face aux urgences.

À partir de ces 9 indicateurs, nous pourrons matérialiser un tableau de bord de niveau 1, structuré suivant :

– en ordonnées : les 9 indicateurs définis ;
– en abscisses : les résultats par années écoulées et l'objectif réaliste pour l'année à venir.

À partir de la sélection de l'un quelconque de ces indicateurs, il doit être possible de « naviguer » pour déterminer sa tendance annuelle, trimestrielle, mensuelle, hebdomadaire ou quotidienne et focaliser sur le niveau inférieur pour analyser les causes d'une dérive.

❑ Exemple d'indicateur synthétique du profil de l'organisation maintenance

Nous allons tracer un diagramme de Kiviat à partir de 12 axes évaluant la performance de 12 domaines de la fonction maintenance. À savoir, par exemple :

1. organisation générale ;
2. méthodes de travail ;
3. suivi technique des équipements ;
4. gestion de l'ordonnancement des travaux ;
5. gestion du stock de rechange ;
6. approvisionnement des fournitures ;
7. organisation matérielle des antennes et de l'atelier ;
8. qualité des outillages ;
9. qualité de la documentation technique ;
10. personnel et formation ;
11. sous-traitance ;
12. contrôle de l'activité.

Chaque domaine est évalué par un audit interne à partir d'un questionnaire explorant les différents critères de performance et de lacune caractéristique (points forts et faibles). On reporte les résultats sur chaque axe d'un diagramme.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

□ **Exemple de diagramme de Kiviat : profil de la fonction maintenance**

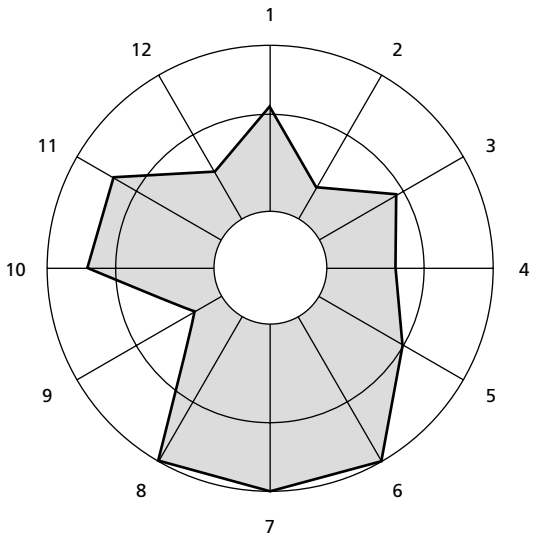


Figure 8.6 – Profil de l'organisation d'un service maintenance

□ **Diagnostic**

Ce diagramme met en évidence un service dont les points forts sont « à dominante technique » (6,7,8,10,11) et les points faibles sont « à dominante gestionnaire » (1,2,3,4,9). Un développement de la fonction méthodes semble indispensable. Une analyse plus fine permettra de déterminer les axes d'action prioritaires pour chaque domaine faible.

La comparaison avec un graphe identique réalisé 6 mois après permettra de mesurer l'efficacité (ou l'inefficacité) des mesures prises.

8.2.3 Ratios de maintenance normalisés (AFNOR X 60-020)

En janvier 1986, l'AFNOR a introduit un certain nombre de « ratios de maintenance et de gestion des biens durables » destinés :

– en interne « à fixer des objectifs économiques et techniques, suivre les résultats pour apprécier les écarts et les analyser » ;

– en externe « à aider les responsables d'entreprise pour se situer et comparer leurs coûts et performances entre sociétés d'un même secteur économique ».

Cette norme expérimentale s'appuie sur une terminologie normalisée (exemple des temps de maintenance) de façon à ce que les saisies (bases de la formation des ratios) soient explicites et reconnues par tous.

❑ Quelques ratios normalisés liés à la politique de maintenance

Tableau 8.1 – Quelques ratios économiques d'après la norme X 60-020

	Ratios économiques	Signification, intérêt et commentaires
8	$\frac{\text{coût des travaux sous-traités}}{\text{coût de la maintenance}}$	Caractérise la politique d'externalisation à relier avec la période : surcharge conjoncturelle, grand arrêt, etc.
9	$\frac{\text{coût de maintenance préventive}}{\text{coût de la maintenance}}$	Caractérise le niveau de préventif choisi et son évolution. À relier avec des indicateurs d'efficacité de la maintenance et au taux de pannes.
10	$\frac{\text{coût des travaux lourds}^{1}}{\text{coût de la maintenance}}$	Peut aider à la décision de remplacement d'un équipement. 1. Révisions, modernisations, rénovations, reconstructions.
11	$\frac{\text{coût des moyens}^{2}}{\text{coût de la main d'œuvre d'intervention}}$	Caractérise le poids relatif des moyens matériels et humains, mis en évidence par la facturation interne. 2. Outillage, moyens matériels pour maintenir, avec amortissements.
12	$\frac{\text{coût de la documentation technique}}{\text{coût de la maintenance}}$	Coût de la création et de la tenue à jour des DTE et autres documents techniques. À relier avec un indicateur de temps efficace d'intervention/durée d'intervention.
13	$\frac{\text{coût des consommés}}{\text{coût des consommés + coût de MO}}$	Aide au choix politique entre la consommation des rechanges ou des réparations par le personnel de maintenance : consommer ou réparer ?
14	$\frac{\text{coût du stock maintenance}^{3}}{\text{coût des biens à maintenir}}$	3. Valeur moyenne des biens de la nomenclature des biens à maintenir.

Nous donnons pour exemple les ratios de (8) à (14) caractérisant des aspects de la politique de maintenance appliquée dans l'entreprise. Ils représentent des « variables d'action » liées aux fonctions développées dans cet ouvrage et ils sont moins usités que les ratios économiques et budgétaires (1) à (7) et que les ratios de suivi des biens et de suivi des activités de maintenance (15) à (27).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

8.3 Le budget du service maintenance

8.3.1 Bases de la gestion budgétaire

❑ Approche comptable

Le Plan comptable français rend la comptabilité générale obligatoire pour toutes les entreprises. Mais la gestion économique d'un service n'est pas possible avec la comptabilité générale. C'est pourquoi le plan comptable a prévu une classe 9 facultative, mais omniprésente, intitulée « Comptabilité analytique ».

Nous nommerons « charges incorporables » les charges présentes dans les deux comptabilités, « non incorporables » celles absentes de la comptabilité analytique. Précisons également qu'en langage comptable les équipements à maintenir représentent des « immobilisations corporelles amortissables » puisque de nature à perdre de la valeur au long de leur cycle de vie.

C'est dans le cadre de la comptabilité analytique que le suivi des dépenses et des budgets sera réalisé. À condition qu'elle soit établie dans une logique industrielle et pas seulement comptable. Une bonne comptabilité analytique doit se retrouver, au moment du démarrage d'une GMAO, intégrable au système de telle manière que le suivi des coûts par la GMAO ne constitue pas une comptabilité parallèle en doublon.

❑ Gestion budgétaire

La direction d'entreprise a pour mission de déterminer les grandes orientations en accord avec les principaux responsables. La gestion budgétaire est la mise au point, pour une période donnée, de l'ensemble des programmes assurant la cohérence financière du plan d'action de l'entreprise. Il importe que tous les niveaux de responsabilité et toutes les fonctions de l'entreprise soient impliqués dans la gestion budgétaire. L'idéal étant d'aboutir à un consensus sur les moyens d'optimiser les ressources de l'entreprise. Le budget maintenance intègre cette discussion stratégique quant aux moyens à développer pour permettre le maintien en quantité et en qualité des produits ou services fabriqués et vendus.

Le contrôle budgétaire consiste à comparer les prévisions avec les réalisations, et à mettre en œuvre les mesures correctives appropriées. Les prévisions de coûts peuvent se faire :

– soit par extrapolation des résultats réels des périodes antérieures ;
– soit par des normes professionnelles ou concurrentielles ;
– soit sur des normes internes définies au bureau des méthodes correspondant à des activités « normales ». Sans oublier qu'en maintenance « l'anormal » (la défaillance majeure ou la catastrophe) est toujours du domaine du possible.

Les écarts doivent pouvoir être détectés à tout stade comptable, les informations de contrôle devant être accessibles rapidement.

8.3.2 Méthodes d'établissement du budget

Deux méthodes s'opposent, l'une étant simple et approximative, l'autre étant plus complexe et plus fiable.

❑ Élaboration du budget par reconduction du passé

La reconduction des budgets passés, et de l'exercice précédent en particulier, associée à des ajustements revient à établir un budget de type « historique ».

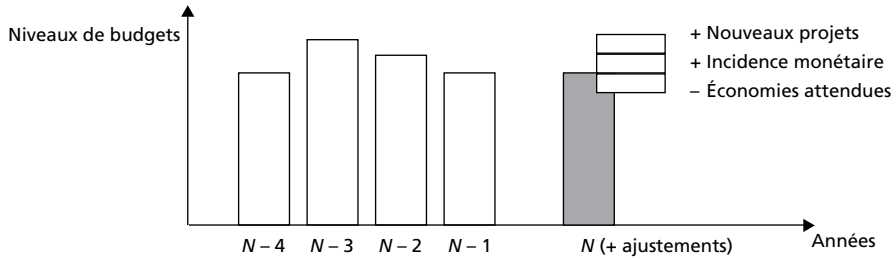


Figure 8.7 – Élaboration d'un budget par reconduction corrigée

Les ajustements concernent la prise en compte estimée des variations monétaires, des variations d'activités, des hypothèses d'évolution de certains centres de dépenses et de l'impact économique des améliorations en cours et prévues. Notons que les frais variables sont réputés proportionnels au niveau d'activité.

Ce travail repose sur la manipulation de macrodonnées à partir de l'expérience et de la connaissance du terrain. Le résultat ne peut être qu'approximatif, mais il est rapide et facile.

❑ Élaboration du budget par planification des besoins

☐ Principe d'élaboration

Le budget sera établi à partir de chaque équipement à maintenir, en listant les travaux correctifs et préventifs prévus ainsi que les investissements suivant le modèle du tableau 8.2.

Pour chaque poste de dépenses, la référence sera la dépense antérieure correspondante modulée par la politique déployée (plus de préventif, donc moins de correctif) et par les travaux spécifiques prévus. Le cumul de ces budgets par équipements sera consolidé en nature de dépenses : achats de rechange, travaux externalisés, etc.

Tableau 8.2 – Établissement d'un budget par équipement

Équipement : XXX		Exercice : 200…			Montant prévu
Travaux prévus	Correctifs	Préventifs	Modifications	Investissements	
Main-d'œuvre					
Prestations extérieures					
Rechanges					
Fournitures					
Coûts annexes					
Totaux					

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Autre avantage de cette méthode d'élaboration du budget : le suivi budgétaire par équipement permet de déceler facilement les dérives, l'outil informatique se révélant incontournable pour analyser les éléments de dépassement de budget par équipement.

□ **Budget base zéro (BBZ)**

Cette variante repose sur le principe de l'allocation optimisée des ressources en fonction d'un objectif de service.

Figure 8.8 – Principe du budget base zéro

La base zéro correspond au service minimal admissible, associé aux moyens minimaux déterminant un budget minimal. Le niveau 1 correspond au niveau normal de service, associé au niveau 1 de budget courant. Le niveau 2 correspond à un niveau de service amélioré, associé à des moyens accrus et à un budget de niveau 2 justifié par de nouvelles prestations.

L'élaboration du BBZ demande la participation de tous les cadres responsables d'un poste budgétaire pour une concertation déterminant les secteurs prioritaires.

8.3.3 Présentation synthétique du budget de la maintenance

Une fois le budget annuel de la maintenance dimensionné, il est nécessaire de le présenter sous une forme structurée dont nous proposons un exemple (figure 8.9).

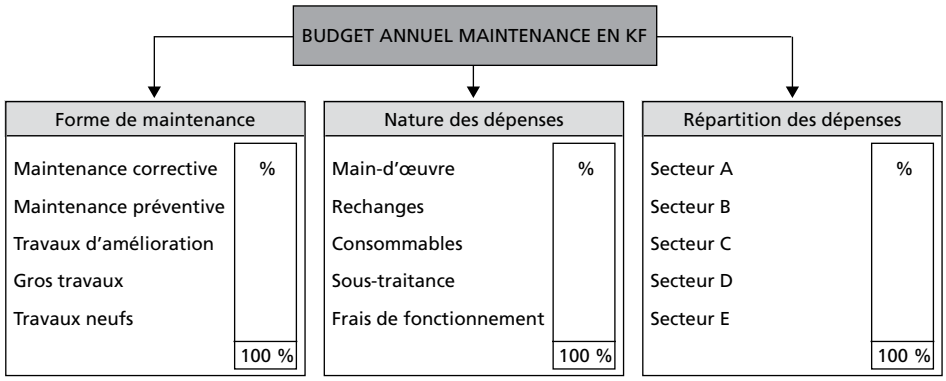


Figure 8.9 – Structure d'un budget de maintenance (exemple)

8.3.4 Problématique spécifique de la fonction maintenance

❑ **La maintenance est un centre de profit…**

Pour les décideurs de formation dominante gestionnaire, la maintenance demeure ce qu'était l'entretien : un centre de coût facilement identifiable. La tentation est donc grande d'obéir au réflexe primaire : conjoncture difficile = réduction des dépenses = réduction du budget maintenance = moins de moyens pour maintenir le parc = plus de pannes et de défauts = pertes de qualité et de productivité → conjoncture encore plus difficile.

Montrer que la maintenance est un centre de profit, comme elle est un gisement de productivité, est un exercice comptable difficile, puisque la preuve est obtenue « par défaut ». Elle implique la maîtrise des coûts indirects, dits « de non-maintenance », analysés au paragraphe 6.3.3. Nous les avions notés C_i = coûts d'indisponibilité d'un équipement, et estimés à partir d'un taux horaire τ de perte de production : $C_i = \tau \cdot T_i$.

Le ratio C_i/C_m illustre la criticité économique d'un équipement.

C_m est dans le budget de la maintenance.

C_i n'y est pas, mais il se retrouve inexorablement dans le prix de revient des produits et des services vendus.

Lorsque $C_i/C_m > 5$, mieux vaut se donner les moyens de maintenir !

❑ **La maintenance est un centre de ressources…**

La maintenance est souvent, de par sa nature et ses compétences, chargée de missions périphériques à la maintenance au sens strict. Il est important de faire apparaître ces diverses activités complémentaires au budget, car leur incidence économique peut être lourde.

C'est particulièrement vrai en PME-PMI, où la maintenance a souvent la responsabilité de la gestion des énergies, de la maîtrise de l'environnement, des services généraux et de la sécurité. Mais toutes ses missions exigent des moyens à budgétiser pour pouvoir être menées à bien, avec la même situation paradoxale que pour la maintenance des équipements : les coûts directs sont visibles sur le plan comptable, les gains le sont moins.

Prenons pour exemple la gestion de l'énergie. Sans moyens suffisants d'analyses, le responsable de maintenance va dépenser les énergies « en aveugle ». Avec de bons moyens d'analyse, il va proposer et réaliser des économies substantielles.

❑ **Les risques d'une réduction drastique du budget de la maintenance**

Nous avons vu que les coûts de maintenance ne sont que la partie visible d'un iceberg dont les pertes sont la partie immergée, bien plus importante. Lorsque la maintenance est considérée sous le seul angle de ses dépenses, les décideurs choisissent une politique à court terme, caractérisée par la réduction simpliste et autoritaire du budget. Pour un résultat économique immédiat, nous aurons inévitablement des effets pervers difficilement récupérables à moyen terme par augmentation des pertes liées aux dysfonctionnements des installations.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

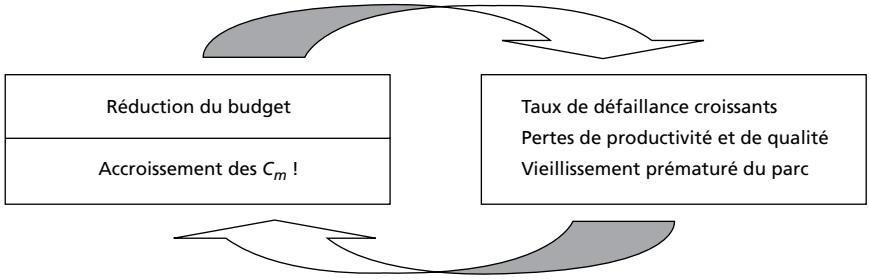


Figure 8.10 – Le cercle vicieux lié à la réduction massive du budget de maintenance

Quels sont les risques liés à une réduction drastique du budget ? Si l'on admet que la réduction sensible des moyens implique la *croissance du taux de défaillance des équipements*, ce qui n'est guère discutable, les risques concernent :

– l'organisation (plus de fortuit, donc moins de planification) ;
– la sécurité (risques liés aux conséquences des défaillances et aux situations d'urgence) ;
– la technologie (dégradation des équipements) ;
– la production (perturbations, productivité diminuée et qualité dégradée) ;
– les hommes (démotivés et stressés par la course contre les pannes) ;
– l'économie (accroissement des coûts directs incontournables de dépannages et de réparations). Mais surtout croissance des coûts indirects d'indisponibilité.

Il ne faut pas confondre cette politique simpliste du court terme explicable seulement par des contraintes financières impératives (conjoncture économique) avec la réduction « stratégique » du budget de quelques pourcent par an, justifiée par l'hypothèse qu'à moyens constants, un service maintenance « stabilisé » est chaque année plus efficace, donc moins dépensier !

8.3.5 Quelques remarques à propos des rémunérations en maintenance

En maintenance, la part majoritaire du budget est constituée de coûts salariaux. Or, dans la nécessaire politique de management participatif (voir § 9.2), la délégation de responsabilité doit être accompagnée par une part individualisée de rémunération motivante.

❑ Structure d'un système de rémunération

Quelles sont les solutions adaptées à cet enjeu ? Décrivons la structure d'un système de rémunération afin d'identifier les facteurs possibles d'incitation par reconnaissance des performances individuelles et collectives, suivant le tableau 8.3.

Tableau 8.3 – Les composantes de la rémunération salariale

Rémunération du salarié en tant que personne **Performance individuelle**	Rémunération FIXE	*Rémunération directe* Salaire de base + compléments individuels liés à la qualification et aux conditions de travail
	Rémunération VARIABLE	*Avantages individuels* Primes variables Logement ou voiture de fonction Retraite complémentaire personnalisée
Rémunération du salarié en tant que membre de l'entreprise **Performance collective**	Privilégié	*Avantages collectifs* Assurance maladie, retraite complémentaire Participation repas, primes diverses Prestations du comité d'entreprise
	Très privilégié	*Participation individuelle* Participation aux résultats, formules d'intéressement Plan d'épargne entreprise (PEE) défiscalisé, actionnariat Stock exchange, abondement

Les primes ou gratifications individuelles sont conditionnées par la réalisation d'objectifs individuels précisés. Donnons quelques exemples de primes collectives : treizième mois, primes de nuit, de jours fériés, de pénibilité, de risque, de travail en hauteur, de travaux salissants, de servitude, d'astreinte, d'attente, de vêtements, de panier, de déplacements, de vacances, etc.

L'« histoire sociale » de l'entreprise explique parfois la survivance de primes ayant depuis longtemps perdues leur raison d'être initiale, mais dont la modernisation négociée est difficile, car le sujet est socialement sensible.

❑ Individualisation de la rémunération

La stratégie salariale consiste à doser les facteurs reconnaissant la performance individuelle (motivation du salarié) et la performance collective (lien entre la performance d'une équipe et sa rémunération). Une bonne politique doit être *équitable, transparente, compétitive, flexible, motivante et cohérente*. Cela fait beaucoup de choses, et le juste équilibre est délicat à trouver entre :

– les besoins, les contraintes, les moyens et les objectifs de l'entreprise ;

– les besoins, les aspirations, les revendications des salariés.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

L'individualisation de la rémunération repose sur trois variables :
– le poste ou la fonction occupée ;
– la reconnaissance des compétences ou des capacités ;
– le potentiel d'évolution, pari sur l'avenir professionnel du salarié.

Notons que l'accord social d'intéressement, concernant l'ensemble des salariés, peut représenter 20 % de la masse salariale brute (ordonnance du 21 octobre 1986).

8.4 L'externalisation des travaux de maintenance

8.4.1 Pourquoi externaliser ? Quelques aspects stratégiques

La majorité des entreprises opte pour une politique centrée sur deux objectifs :
– la volonté de se « recentrer sur le cœur du métier » en externalisant les tâches satellites ;
– la volonté de réduire ses coûts internes.

La conjugaison de ces deux axes stratégiques amène à se poser la question du pourquoi : d'où vient la volonté de sous-traiter des activités de maintenance ? La réponse est : « afin de réduire les coûts logistiques », la maintenance étant un facteur logistique en tant que moyen d'aide à la production.

La *conséquence interne* en est la réduction quantitative d'un personnel dont le niveau d'exigence qualitative s'élève. Moins de personnel, mais plus de qualification et plus d'efficacité. *La conséquence externe* est le recours accru à la prestation de service en partenariat avec des « entreprises de maintenance ».

Une enquête de 1997 mettait en évidence les deux raisons majeures d'externalisation : la volonté de réduire les coûts (60 %), et le désir d'améliorer les prestations (35 %).

❑ Facteurs historiques

Dans de nombreuses entreprises, les services « entretien-travaux neufs » se sont structurés et dimensionnés dans le passé pour pouvoir répondre à toutes les demandes internes, pour assurer un « service général » qui permet à l'entreprise d'être autonome. C'est ainsi que l'on trouve encore dans les services techniques des peintres, des menuisiers et des jardiniers.

Dans sa forme actuelle, la maintenance a seulement pour vocation le maintien de l'outil de production et d'équipements périphériques sensibles (la génération d'énergie). D'où le besoin de développer et d'encadrer des équipes internes, réduites, à haute technicité et ayant un fort savoir-faire sur les équipements supportant « le métier » : se priver de ce savoir-maintenir la production augmenterait considérablement la vulnérabilité et la dépendance de l'entreprise. D'où la possibilité (selon un besoin à évaluer cas par cas) d'externaliser certaines fonctions « excentrées », naguère intégrées au service « entretien », mais n'exigeant pas la conservation d'un savoir-maintenir stratégique en interne.

❑ Facteurs stratégiques

– Le facteur majeur est la crainte d'un retournement de situation, d'une chute d'activité : les conséquences internes seront moins douloureuses en cas de recours à la

sous-traitance, même si la solution interne est plus rentable à court terme.

– L'évolution de la manière de sous-traiter est également un facteur favorisant : la relation donneur d'ordre/prestataire évolue vers un partenariat assis sur une base contractuelle négociée, contrôlable par ses résultats. Cette évolution d'un a priori de méfiance vers la confiance envers quelques partenaires sélectionnés est un critère important de choix d'externalisation. Il en va de même pour ce qui est de la préservation de la confidentialité, argument limitant la sous-traitance à des prestataires de confiance.
– Autre évolution : la globalisation de l'offre qui permet de sous-traiter un service complet, en allégeant le travail des gestionnaires internes.
– Autre facteur, la prévision et le suivi des coûts sont plus faciles à partir d'un contrat de prestation facturé que par l'analyse économique des activités internes.

❑ Facteurs économiques

Outre la volonté « générale » et peu originale de réduire les coûts, certains facteurs plus particuliers peuvent justifier une prestation de service :

– faire face à une surcharge d'activité ponctuelle, conjoncturelle ou saisonnière. Un arrêt annuel d'unité de production, par exemple ;
– assurer des travaux très spécialisés pour lesquels des prestataires sont mieux outillés et mieux entraînés, donc mieux placés en rapport qualité/prix. Exemple : détartrage de tubes de chaudières, la maintenance des ascenseurs, des climatisations, etc. ;
– assurer des travaux qui exigeraient un investissement en moyens non amortissables, car trop rares. Exemple : la maintenance conditionnelle par contrôle infrarouge, le rebobinage d'un moteur, etc.

❑ Facteurs sociaux

– L'insertion de certaines qualifications, hors du champ habituel des conventions collectives d'un secteur industriel (chauffeurs par exemple), est parfois délicate (problèmes d'horaires, de conditions de travail, etc.). Ce peut être un argument pour ne pas intégrer ces personnels, et sous-traiter l'activité.
– Face à des difficultés de recrutement (profil de poste très particulier, ambitieux ou atypique) ou de plan de carrière cohérent (besoin ponctuel d'une qualification), l'externalisation peut être une solution.
– Face à une compétence interne insuffisante, à une implication insuffisante du personnel ou à une situation de tension sociale, le recours à l'externalisation est parfois la solution incontournable. Dans une logique de « juste à temps », la panne la plus redoutable est la panne sociale (grève), qui peut paralyser l'ensemble des activités d'une entreprise. En tout cas, il est plus facile et plus rapide d'externaliser que d'améliorer le rendement interne de gens qui ne se sont jamais sentis en situation de concurrence.

Pour certains « grands donneurs d'ordre », il y a obligation « politique » et sociale à laisser ouverts les robinets de la sous-traitance, même en cas de plan de charge interne réduit, de façon à ne pas « asphyxier » les prestataires et le tissu social voisin.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ **Les limites de l'externalisation**

Les limites seront trouvées par la mesure de l'impact sur l'outil de production. Elles sont techniques, de façon à conserver le savoir-faire interne sur les équipements sensibles, même si des opérations complexes sont ponctuellement confiées à des spécialistes. Elles sont stratégiques, le risque de défaillance d'un fournisseur pouvant mettre l'entreprise en danger.

❑ **Une situation de concurrence…**

N'oublions pas que, face à toutes ces bonnes raisons d'externaliser, les *équipes de maintenance interne* ont de nombreux avantages concurrentiels à faire valoir dans les domaines très intégrés au processus de production. En particulier leur capacité :

– à intervenir en temps réel, rapidement sur un site bien connu,
– à détecter les pannes et à réduire leur taux dans une démarche cohérente d'amélioration continue,
– à préserver la confidentialité des processus,
– à assurer leur mission de maintien tout au long du cycle de vie d'un équipement.

D'autres critères favorisent la maintenance interne : citons la législation qui pousse à travailler en main-d'œuvre interne et la réduction du « papier » : ouverture de chantier, dossier sécurité, etc.

Mais ces équipes doivent prendre conscience qu'elles appartiennent à une entité « prestataire de service interne » privilégiée, puisque ses clients sont sur place ! Cette entité « prestataire interne de services de maintenance » :

– doit apprendre à vendre ses services à ses différents clients internes ;
– doit mieux communiquer (explications relatives aux méthodes, aux moyens, aux résultats et aux risques) ;
– doit mieux connaître les attentes de ses clients pour mieux les satisfaire ;
– doit prouver à ses clients qu'elle est mieux placée que ses concurrents « entreprises de maintenance » pour garantir la trilogie « coûts, qualité, délais ».

L'ensemble de ces critères peut déboucher sur la rédaction d'un *contrat de maintenance* passé avec l'ensemble des clients internes.

8.4.2 Quelles activités de maintenance faut-il externaliser ?

Que faut-il garder, que peut-on et que doit-on externaliser ? Comme pour toutes les questions abordées dans cet ouvrage, la réponse appartient en propre au décideur face à ses contraintes, à son environnement et à ses objectifs. Mais bien poser les bonnes questions aide à y répondre, ainsi que la connaissance des tendances actuelles.

Nous nous placerons donc dans le cas d'une volonté exprimée de recentrage des activités sur le métier en pensant que la tendance va de la sous-traitance monotechnique vers le multiservices.

❑ **Que faut-il garder en interne ?**

– *La direction du service* – cela peut sembler évident –, afin de garantir la cohérence et la maîtrise du management des activités et des projets.

– *Le service* « *méthodes-maintenance* », qui est le centre vital de la gestion des activités internes et externes ainsi que de la recherche d'amélioration permanente de l'efficience du process et de l'efficacité du service.
– *Les interventions de niveaux 1 et 2*, car, par nature, elles impliquent une action rapide qui ne peut venir que des gens qui sont sur le terrain, et le connaissent parfaitement. Le transfert de compétence vers les équipes de production entre dans cette logique de réactivité accrue, incompatible avec une action venant de l'extérieur.
– *La maintenance préventive*, par son caractère stratégique, s'appuyant sur l'historique et l'expertise des défaillances, sur la connaissance des phénomènes pathologiques propres au process, n'est pas facile à exporter. Par contre, certains aspects simples de la maintenance systématique (tels que la lubrification) ou « pointus » de la maintenance conditionnelle (CND, tels que le contrôle radiographique ou infrarouge) peuvent être sous-traités.
– *Les interventions d'amélioration*, liées directement à l'équipement de production, afin de garder la maîtrise technologique et de préserver le savoir-faire.

❑ Que doit-on externaliser ?

L'idée directrice est d'externaliser les activités dont la technicité requise est « décalée » par rapport aux compétences internes liées « au métier ». Il en est ainsi pour des travaux à faible technicité ou à technicité très spécifique, ainsi que les travaux lourds réalisables en temps différé ou impliquant une grosse surcharge (arrêts, par exemple). Il semble rationnel de sous-traiter, après vérification de la rentabilité :

– les interventions de niveau 4, telles que les grosses modifications, les arrêts périodiques, les rénovations ou les reconstructions. Préparées et gérées en interne, elles correspondent à des charges de travail que les équipes internes ne peuvent pas assurer ;
– les travaux d'exécution d'outillage ou de pièces de rechange ;
– les travaux d'entretien général, requérant des compétences en génie civil et bâtiment, électricité générale, plomberie, etc. ;
– la réalisation de certains travaux neufs, leur conception restant sous la responsabilité du service ;
– les travaux de maintenance d'équipements périphériques : il en est ainsi pour les appareils de contrôle, l'informatique, les réseaux de communication, les stations d'épuration, les ascenseurs, les compresseurs et les groupes électrogènes, les groupes de froid, de climatisation, les engins de manutention et de levage, le parc de véhicules, etc. y compris la maintenance préventive de ces matériels ;
– l'élimination et le traitement des déchets industriels, la gestion pouvant se faire en interne ;
– des travaux demandant un matériel spécifique, investissement non amortissable en interne. Par exemple, le bobinage des moteurs, certains nettoyages industriels spécialisés, les techniques de traitements de surface ou de rechargement, l'usinage sur site, la mise en œuvre de contrôles non destructifs coûteux, etc. ;
– le conseil, par nature, puisque l'œil extérieur du consultant et le recul par rapport au quotidien sont nécessaires aux propositions d'évolution ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– l'ensemble des services généraux relatifs à l'infrastructure. C'est le concept de *facilities management*, qui consiste à déléguer la maîtrise de l'entretien et de l'exploitation relatifs à la vie du bâtiment : gardiennage, accueil, restauration, courrier, GTB (gestion technique du bâtiment), etc.

Suivant le caractère épisodique ou régulier de ces prestations, il faudra négocier soit des contrats de travaux, soit des contrats de maintenance.

❑ **Que peut-on éventuellement externaliser ?**

Tout le reste ! Avec des arguments pour et des arguments contre qu'il est nécessaire d'évaluer, puis de réévaluer périodiquement. Citons quelques domaines où l'offre de service existe :

– la formation : elle peut se faire en interne ou en externe, suivant l'objectif à atteindre ;
– la constitution des dossiers techniques ;
– certaines tâches de nettoyage, à partir du choix stratégique « responsabilisons le personnel par l'autonettoyage du poste » ou « ce n'est pas notre métier, sous-traitons » ;
– les interventions de niveau 3, grosses réparations pour lesquelles une analyse comparative des coûts est nécessaire ;
– les diagnostics par contrôle vibratoire et par analyses de lubrifiant ;
– l'aide à la recherche de certification ISO 9000 ou ISO 14000.

Notons le cas de « l'aide à distance » (télédiagnostic, par exemple), qui correspond à un type de prestation ponctuelle appelée à se développer.

Combien sous-traiter ? Quoi sous-traiter ? Il appartient à chaque responsable de service maintenance de trouver le juste équilibre, d'adapter sa stratégie à la conjoncture, sachant que la tendance « faisons tout nous-mêmes » est irréaliste alors que la tendance « sous-traitons la maintenance » est irresponsable, tout au moins dans l'industrie.

8.4.3 Comment externaliser ?

De nombreuses formules d'externalisation existent. Il faudra négocier avec le prestataire la formule la mieux adaptée suivant qu'il s'agit d'une prestation ponctuelle ou d'une prestation régulière se prêtant à un contrat de maintenance. Sans oublier que le « faire-faire n'est pas le laisser-faire » …

❑ **Application des normes ISO 9000 à la certification des prestataires de service**

L'AFNOR a apporté pour la première fois un cadre structurant les obligations contractuelles entre donneurs d'ordre et prestataires de service : c'étaient les normes X 60-100, -101, -102, -103 relatives aux contrats privés de maintenance, à leurs clauses techniques, juridiques et financières et aux règles d'appel d'offre.

Remarque

Les marchés publics sont soumis à des règlements particuliers.

La certification ISO 9000 (voir § 9.3) est le prolongement de cette normalisation française, certifiant l'assurance qualité du prestataire sans que le donneur d'ordre ait besoin de faire des audits répétitifs de ses fournisseurs. Des organismes certificateurs agréés par le ministère de l'Industrie attestent la conformité du service aux référentiels ISO, ce qui revient à rationaliser les relations clients/fournisseurs à partir d'un système d'organisation de l'assurance qualité.

❑ Les différentes formes de sous-traitance

Suivant la nature des travaux, plusieurs modalités de sous-traitance sont envisageables.

□ Contrat de maintenance

C'est la forme la plus sûre et la plus élaborée de contrat entre un donneur d'ordre qui a la charge de définir les modalités techniques du travail à réaliser, et un prestataire de service (qui peut être une entreprise de maintenance). Il correspond à une prestation régulière (voir § 8.4.4, Les contrats de maintenance et leurs clauses).

□ Devis

À l'inverse, le devis s'applique à une prestation ponctuelle et urgente : chaque prestataire pressenti estime un montant des travaux demandés. Le « moins-disant » remporte le marché.

□ Forfait

Le travail sous-traité est prédéfini qualitativement et quantitativement. Le marché peut se passer « de gré à gré » avec des entreprises partenaires privilégiées (solution rapide), ou après consultation et mise en concurrence de plusieurs entreprises.

□ Bordereau

Le travail prédéfini sera « métré », le coût étant obtenu à partir du prix de l'unité d'œuvre × métrage.

Exemples

Prix du mètre carré de peinture, du mètre cube de béton, de la tonne transportée, du mètre linéaire de cordon de soudure, etc.

□ Régie contrôlée

Il s'agit d'un marché de fourniture : le prestataire s'engage à fournir de la main-d'œuvre spécialisée à un coût horaire fonction de la qualification (voir le Délit de marchandage, § 8.5.5), des matières consommables, de la location de matériels ou d'outillages.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ Mission temporaire

Relative à des travaux épisodiques, dans le cas d'une surcharge ponctuelle par exemple, la mission temporaire concerne le travail intérimaire. Le marché porte sur le prix horaire, fonction de la qualification.

❑ Modalités financières des marchés et des contrats de maintenance

Les dispositions financières prévues dans un contrat comprennent :
– la méthode de calcul du prix, à négocier ;
– les conditions de paiement et de facturation ;
– éventuellement une formule de révision des prix ;
– éventuellement des bonifications/pénalités de retard.

Nous allons décrire six méthodes de calcul des prix, qu'il faudra négocier avec le prestataire suivant l'urgence et l'importance des travaux et les risques liés aux aléas.

☐ Graphes des six méthodes de calcul des prix

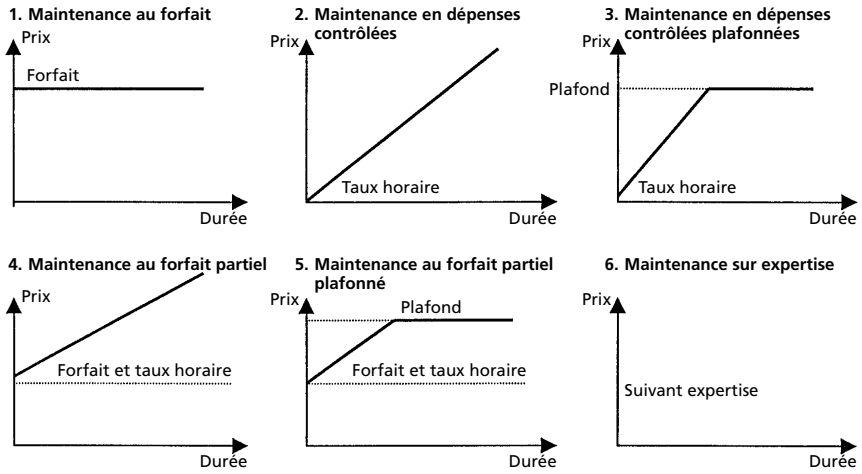


Figure 8.11 – Les différentes méthodes de calcul des prix

☐ Description des méthodes de calcul de prix

Chacune de ces méthodes contient un risque financier, reporté majoritairement sur l'un ou l'autre des contractants, ou plus équitablement réparti.

1. Maintenance au forfait

À partir de la définition de la prestation, un prix est fixé, donc connu à l'avance ce qui est un avantage pour le contrôle budgétaire. Indépendant de la durée de la prestation, le forfait fait courir un risque financier pour le prestataire.

2. Maintenance en dépenses contrôlées

Le prix, non connu à l'avance, est fonction de la durée et du taux de la main-d'œuvre et des moyens fournis. Le risque financier lié à la durée de la prestation est pour le donneur d'ordre.

3. Maintenance en dépenses contrôlées plafonnées

L'entreprise s'engage sur la mise en œuvre de moyens à un taux fixé, mais également sur le non-dépassement d'un certain plafond, à ses risques. Le coût maximal est connu à l'avance.

4. Maintenance au forfait partiel

On ajoute à un montant forfaitaire de base un prix proportionnel aux moyens mis en œuvre, ce qui présente l'inconvénient de ne pas pouvoir maîtriser le prix final de la prestation. D'où la méthode 5.

5. Maintenance au forfait partiel plafonné

C'est la méthode la plus sophistiquée, mais c'est celle qui assure la meilleure répartition des risques, qui intéresse les deux parties à l'efficacité et qui permet de maîtriser le coût final.

6. Maintenance sur expertise

Elle est adaptée au cas fréquent en maintenance (rénovation par exemple) où seul un démontage suivi d'une expertise permet d'évaluer les travaux à entreprendre. La maintenance sur expertise se décompose donc en deux parties :

– une partie forfaitaire (ou autre méthode) relative au démontage-expertise-remontage ;
– une partie relative aux travaux déduits de l'expertise, traitée par l'une des méthodes exposée.

Un panachage de ces méthodes est évidemment possible suivant la nature des prestations.

□ Le modèle américain du *cost and fee*

Réservée aux contrats de maintenance, cette méthode de rémunération a pour objet d'intéresser économiquement le prestataire aux résultats, en partageant les progrès de productivité et les profits induits avec le donneur d'ordre, donc en créant une situation de convergence d'intérêts.

Il existe plusieurs formes de contrats « à objectifs partagés », dont nous donnons un exemple avec le « *cost and fee and target estimate* ». La rémunération du prestataire est donnée par :

$$R = F + C + a\,(E - C)$$

C, cost, représente le coût direct en salaires et charges imputables aux travaux du contrat.

F, fee, est un forfait (frais généraux, coûts indirects, marge, etc.) du prestataire.

E, *target estimate*, est la valeur cible de *C*, déterminée par les deux parties.

a est un coefficient de participation, souvent fixé à 0,5.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ **Synthèse des relations contractuelles**

Le tableau 8.4 propose une synthèse des contrats envisageables associés à leurs critères de choix.

Tableau 8.4 – Les contrats du service maintenance

Équipements	Travaux	
	Maintenance de niveau 1 + 2 (+3)	**Travaux « lourds » Grands arrêts, rénovations, travaux neufs**
Stratégiques	« Contrats internes » (formalisation envisageable) Pas de sous-traitance	« Contrats de travaux » Prestations ponctuelles
Non stratégiques et périphériques	« Contrats de maintenance » Prestations régulières	

Remarquons qu'outre les prestations de service envisagées ici le marché peut porter sur la seule fourniture de consommables et de pièces détachées.

8.4.4 Les contrats de maintenance et leurs clauses

❑ **Quelques définitions AFNOR X 60-105 (1994) à connaître**

☐ **Donneur d'ordre**

« Toute entité amenée à confier des prestations relatives à la maintenance à un prestataire dans le cadre d'une relation contractuelle. » Il est aussi appelé client, acheteur, contractant ou utilisateur.

☐ **Prestataire**

« Toute entité amenée à effectuer des prestations de maintenance pour un donneur d'ordre dans le cadre d'une relation contractuelle. » Il est aussi appelé fournisseur, titulaire du contrat ou entreprise de maintenance.

☐ **Contrat de moyens**

« Contrat par lequel un prestataire s'engage à mettre à disposition d'un donneur d'ordre les moyens jugés nécessaires à la réalisation d'une prestation pour laquelle les résultats ne sont pas quantifiés. » Les moyens peuvent être immatériels (logiciels) ou matériels (pièces, outillages, fournitures).

☐ **Contrat de résultats**

« Contrat par lequel un prestataire s'engage à réaliser une prestation définie par des objectifs quantifiés. » Les conditions données peuvent intégrer les contraintes liées à l'exploitation des biens (disponibilité, sécurité, etc.), les délais de réalisation, les coûts associés, l'environnement, etc.

❑ **Cadre juridique d'un contrat de maintenance**

Les clients aussi bien que les fournisseurs appelés à se lier par contrat de maintenance doivent s'aguerrir aux aspects juridiques, ce qui induit un changement culturel

face à la technique à outrance. Donnons quelques bases.

☐ Contrat de maintenance

C'est un « contrat d'entreprise » défini ainsi : « […] contrat par lequel un prestataire s'oblige contre rémunération à exécuter de manière indépendante un travail déterminé par le maître de l'ouvrage » (article 1787 du Code civil).

Le contrat d'entreprise est synallagmatique (engagement réciproque) et onéreux. Le prestataire agit « de manière indépendante » sans lien de subordination entre lui et le maître d'ouvrage.

☐ Sous-traitance, cotraitance et tierce maintenance

La *sous-traitance* est définie par la loi du 31 décembre 1975 comme « l'opération par laquelle un entrepreneur confie à une autre personne appelée sous-traitant (le fournisseur) tout ou partie de l'exécution du contrat d'entreprise conclu avec le maître de l'ouvrage (le client) ».

La *cotraitance* est l'engagement de plusieurs entrepreneurs à exécuter un même travail en qualité d'égaux. Dans le cas où il y a une « entreprise pilote », il n'y a pas de subordination entre cette entreprise pilote et les autres cotraitants, mais seulement une délégation de coordination.

La *tierce maintenance* : « il y a tierce maintenance quand la maintenance du matériel est confiée à un tiers au contrat de fourniture initial ». Il y a dans ce cas deux situations juridiques distinctes :

– le contrat de fourniture entre le fournisseur et le client;
– le contrat de maintenance entre le tiers et le client.

Remarque

La tierce maintenance est souvent pratiquée pour des raisons de proximité du tiers.

☐ Obligations des parties

Il est important de bien connaître les nombreuses obligations auxquelles chaque partie est soumise. Il serait trop long de les décrire ici, mais nous allons illustrer le cas intéressant de la différence entre « l'obligation de moyens » et « l'obligation de résultats ».

Lorsque le prestataire a failli, il est responsable des fautes qu'il commet, et il appartient normalement au client « donneur d'ordre » de prouver cette faute : c'est « la charge de la preuve » logique dans un contrat avec obligation de moyen. Pour un contrat à obligation de résultats, il y a renversement de la charge de la preuve, et c'est le prestataire qui doit prouver qu'il n'a pas commis de faute.

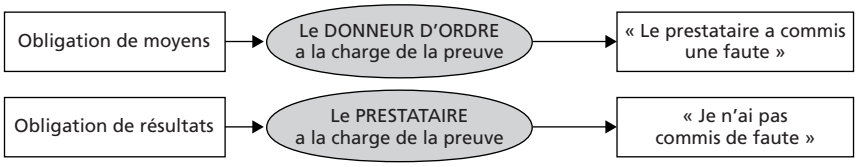


Figure 8.12 – Une subtilité juridique à connaître : la charge de la preuve

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Les contrats à obligation de résultats ayant tendance à se substituer aux autres, on comprend l'intérêt qu'il y a à connaître les « règles du jeu ».

❑ Règles de l'appel d'offre d'un contrat

L'AFNOR a défini un cadre de normalisation pour l'appel d'offre relatif à un contrat privé de maintenance (norme X 60-101). Il peut être intéressant d'en tirer une liste de rubriques en guise d'« aide-mémoire » pratique pour ne pas omettre certains critères : les agents des méthodes sont rarement des juristes confirmés, et leur chef de service pas davantage.

□ Objet de l'appel d'offre

Nature des opérations à effectuer :

– définition de la nature des opérations à effectuer (correctives, préventives, les deux) ;
– définition d'une opération déterminée (réparation, révision, visites, etc.).

Types de matériels :

– nature, nombre et localisation des équipements à maintenir ;
– désignation des équipements et des technologies constitutives.

Modalités particulières :

– précisions relatives aux fréquences et délais d'interventions, aux permanences ;
– définition des résultats à atteindre ou des moyens à mettre en œuvre ;
– définition des moyens de coordination et des interlocuteurs ;
– documents contractuels, dont le cahier des prescriptions techniques.

□ Définition précise de la prestation

Nature des travaux :

– nature de la maintenance et limites des prestations ;
– travaux de modification ou d'amélioration ;
– travaux avec équipes en place, avec effectif renforcé, etc. ;
– ressources documentaires à disposition du prestataire.

Mission de l'entreprise de maintenance :

– inventaire de départ ;
– suivi du calendrier d'intervention, rapports de maintenance ;
– mise à jour des nomenclatures, plans et schémas ;
– tenue des registres imposés par des textes réglementaires ;
– définition des garanties éventuelles.

□ Définition du personnel

Composition de l'équipe proposée :

– responsables de l'encadrement ;
– précisions sur les spécialités requises, les habilitations et les qualifications ;
– modalités d'intervention en urgence.

Horaires :

– horaires pratiqués habituellement ;

– dispositions spécifiques pour jours fériés et périodes de congé.

☐ **Définition des fournitures et des charges pour chaque partie**

Tableau 8.5 – Répartition des fournitures et des charges

	DO (donneur d'ordre)	PS (prestataire de service)
Pièces à changer		X
Matières consommables	X	
Outillage individuel		X
Matériel, engins, véhicules nécessaires		X
Gestion du stock de rechange	X	

– Cas particulier de fournitures spécifiques.

– Locaux mis à disposition.

☐ **Prix**

– Formule proposée : voir les méthodes de calcul des prix.

– Conditions de révision de prix.

– Pénalités et bonifications éventuelles.

– Modalités de règlement, taux des travaux supplémentaires hors contrat, cautionnement éventuel.

☐ **Autres clauses**

Assurances :

– attestation, définition des garanties ;

– responsabilité civile d'exploitation, responsabilité professionnelle avant et après travaux ;

– bris de machine pour compte de…

Sécurité :

– règles générales de sécurité ;

– dispositions particulières de sécurité : incendie, produits toxiques, radiations, conditions d'accès au chantier, circulation dans l'entreprise, protection de l'environnement, protection du chantier, autre.

Durée du contrat :

– contrat à durée déterminée : date d'entrée en vigueur et durée ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– contrat à durée indéterminée : date d'entrée en vigueur, durée de la période de tacite reconduction et préavis de dénonciation.

Conditions contractuelles de résiliation :

– exposé des motifs de résiliation : non-respect des échéances de paiement, non respect des clauses de sécurité, non-respect des garanties prévues, etc. ;

– durée de préavis de résiliation.

Modalités de remise d'offre :

– pièces constitutives du dossier ;

– condition d'envoi et de remise des offres, dates limites de remise.

Règlement des litiges : tribunaux ou arbitrage.

❑ Clauses techniques

Une prestation de maintenance peut être définie soit par son contenu, soit par ses résultats, la tendance favorisant « l'obligation de résultats », qui correspond plus au « partenariat par objectifs partagés ».

□ Contrats à obligation de moyens

La prestation peut concerner soit une opération de maintenance préventive ou corrective déterminée, soit la prise en charge de l'ensemble des opérations de maintenance pendant une période fixée. Elle est définie par son contenu.

Le rédacteur des clauses techniques (un agent des méthodes, classiquement) doit préciser le niveau d'intervention, le volume d'heures alloué, le délai, les qualifications requises et il doit fournir les gammes d'opération.

□ Contrats à obligation de résultats

La difficulté de ce type de contrat vient de la spécification objective du résultat à obtenir et des moyens de contrôle nécessaire à la réception des travaux.

Exemples de spécifications de résultats

– Une cadence moyenne, une capacité de production minimale, une valeur de disponibilité opérationnelle d'un équipement.
– Un temps maximal d'indisponibilité par intervention, un temps de réponse à l'intervention.
– Un état de référence spécifié.
– Un potentiel d'utilisation (nombre de durées d'usage) à l'issue de l'intervention.

□ Clauses techniques particulières

Elles doivent préciser la nature des contraintes d'environnement (climatiques, accessibilité, mécaniques) et des contraintes d'exploitation (calendrier de mise à disposition, par exemple).

Elles doivent définir les éléments de logistique et la répartition des charges de fournitures ainsi que les éléments de la coordination technique, en particulier la désignation des interlocuteurs.

☐ **Conditions de réception : le contrôle de conformité**

Cas du contrat à obligation de moyens

La recette est matérialisée par un bordereau récapitulatif comportant la liste des travaux, et pour chacun d'eux :

– les temps prévus et passés, les délais d'exécution prévus et réalisés ;
– la conformité des travaux par rapport aux gammes et aux qualifications des intervenants.

Cas du contrat à obligation de résultats

La recette se fait par la mesure des résultats obtenus sur une période d'observation postintervention prédéterminée. Dans certains cas (mesure de disponibilité), il peut être indispensable de réaliser le traitement statistique prédéterminé d'un échantillon de valeurs-résultats.

☐ **Garanties**

Outre les garanties légales (en particulier celle relative aux vices cachés) prévues par le Code civil (article 1641), des clauses de garantie contractuelle peuvent être incluses. En particulier, une garantie contractuelle peut couvrir :

– les risques liés à la période de déverminage postintervention,
– la main-d'œuvre et ses déplacements,
– les fournitures ainsi que leur expédition.

❑ **Clauses juridiques et financières**

☐ **À propos des clauses juridiques…**

Un technicien n'étant généralement pas un juriste, l'assistance d'un juriste est indispensable pour la rédaction de clauses qui doivent prendre en compte, ou ne pas contredire de très nombreux textes réglementaires portant sur l'hygiène, la sécurité, la législation sociale, la protection des travailleurs, la sous-traitance et les contrats de maintenance, etc.

C'est la raison pour laquelle la rédaction d'un « contrat type » élaboré avec l'aide d'un juriste semble utile. Un conférencier, juriste et directeur d'une entreprise de service en maintenance, disait un soir devant un auditoire de responsables de maintenance : « vous ne conduiriez pas sans connaître le code de la route, alors que vous passez des contrats sans en connaître les règles… ».

☐ **À propos des clauses économiques…**

La principale disposition concernant le mode de calcul des prix est étudiée au paragraphe 8.4.3. Les autres dispositions se rapportent aux modalités de règlement et aux assurances souscrites ou à souscrire par chacune des deux parties. En particulier, l'analyse des risques encourus par les personnes (dommages corporels) et les biens (dommages matériels et immatériels tels qu'une perte d'exploitation) doit précéder le choix des polices.

Outre la police « responsabilité civile », l'entreprise peut couvrir les risques matériels la concernant par des polices complémentaires de type incendie, bris de machine, perte d'exploitation, etc.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ **Clauses d'hygiène et de sécurité**

Nous sommes là encore face à un dispositif réglementaire complexe, mais à connaître néanmoins. Concernant la sécurité, un « plan général de sécurité » destiné aux entreprises extérieures est indispensable. Il ne dispense pas de la rédaction d'un « plan particulier de sécurité » comportant les procédures définies pour chaque travail externalisé (définition des protections individuelles, identification des risques d'environnement, etc.), signées par les responsables sécurité désignés par chaque partie.

Remarquons que le législateur a prévu trois situations de « chantiers de sous-traitance », auxquelles se rapportent des réglementations différentes :

– le chantier est entièrement à l'extérieur de l'entreprise ;
– le chantier est à l'intérieur, mais isolé et indépendant de l'activité de l'entreprise ;
– le chantier est à l'intérieur, mais dépendant de l'activité de l'entreprise.

8.4.5 Cas des grands arrêts : organisation de la sous-traitance

Les grands arrêts périodiques (caractéristiques de la pétrochimie) concentrent tous les problèmes de la maintenance sur un temps très court, dans un espace limité, à partir d'un gros budget, d'un lourd travail de préparation et de planification, puis de suivi de centaines d'intervenants extérieurs réalisant des milliers d'opérations liées.

Dans ce contexte, un partenariat et une coopération forte entre le donneur d'ordre et les prestataires de service sont incontournables : sans cette alliance, il ne peut y avoir de « bon arrêt », caractérisé par un redémarrage au jour prévu, sans problèmes techniques rémanents et sans dépassement du budget prévu.

S'il y a unanimité pour témoigner de l'importance d'un partenariat dans la réussite d'un arrêt, les modes de gestion de ce projet sont diversifiés, car plusieurs options existent.

❑ **Options de découpage des travaux**

Lors d'un arrêt, les consultations d'externalisation, puis les attributions de marché se font à partir d'un découpage des travaux à réaliser. Plusieurs options sont possibles :

– le découpage par unité de production : le plus favorable pour que tous les équipements et tous les travaux soient confiés à une entreprise prestataire qui gère elle-même les différents lots à l'intérieur de l'unité ;
– le découpage par zones géographiques ;
– le découpage par métier : les opérations sont confiées à des entreprises par corps de métier (chaudronnerie, mécanique, nettoyage, montage, etc.) ;
– le découpage par classe d'équipements, qui amène à un grand nombre de prestataires spécialisés (compresseurs, groupes électrogènes, climatisation, etc.).

Face au problème de la prolifération des marchés, une demande de « globalisation » existe, passant par la cotraitance et allant jusqu'à l'interlocuteur unique : l'entreprise générale.

❑ **La préparation est la phase clé : peut-on la sous-traiter ?**

La réussite d'un arrêt passe par la *rigueur de la préparation*. Cette rigueur a un coût direct, mais c'est la principale source d'économie, car elle limite les imprévus, donc

les dépassements de délais et de budgets et elle permet de réduire les effectifs. *Peut-on sous-traiter la préparation ?* Oui, des arguments existent :

– la préparation devant précéder l'arrêt de plusieurs mois, il n'est pas toujours possible de détacher une équipe de préparateurs au détriment des tâches courantes de maintenance ;
– la gestion d'un projet lourd est spécifique : elle s'appuie sur un professionnalisme, sur une méthodologie et sur des outils logiciels qu'un service maintenance ne possède ou ne maîtrise pas toujours ;
– l'espacement des arrêts est généralement croissant (de 1 an à 3 ans, puis 5 ans). Cela ne justifie plus d'avoir une équipe permanente affectée à la gestion de projet, ni l'informatique nécessaire.

La difficulté majeure réside dans la non-connaissance du terrain de la part des préparateurs externes. Ce qui est résolu par la présence des préparateurs très en amont, à partir d'un « état des lieux » préliminaire. Une coopération méthodes internes/préparateurs externes est alors indispensable.

❑ Sous-traiter l'ensemble de l'arrêt : l'option « entreprise générale »

La préparation, l'appel d'offre puis la maîtrise d'œuvre de l'arrêt étaient traditionnellement traités en interne. Nous avons vu les difficultés que cela entraîne quant aux moyens internes nécessaires.

Une solution émergente est la délégation de cette maîtrise d'œuvre à une entreprise générale pilote, qui est l'interlocuteur unique du donneur d'ordre. L'entreprise générale est responsable de la totalité des travaux. Elle passe elle-même les contrats nécessaires et assure la coordination, la supervision et la « bonne fin » du projet.

Le marché existe, et quelques groupes proposent ces services très structurés et de plus en plus « professionnels », car il ne s'agit plus seulement d'une mise à disposition de moyens. Ces groupes ont en outre l'avantage de pouvoir « capitaliser » des expériences mieux qu'aucun donneur d'ordre ne peut faire.

Ces contrats « lourds » sont évolutifs : au cours d'une première période, client et prestataire apprennent à travailler ensemble à partir de « l'état des lieux » de départ. Le passage au « contrat de résultats » implique le prestataire dont la rémunération est liée à l'efficacité constatée. Une mission globale lui étant confiée, il est naturel que le prestataire s'engage sur des résultats, l'objectif étant la pérennisation du partenariat.

Pour le donneur d'ordre, l'avantage est de ne plus avoir à gérer la surcharge interne liée à la coordination des travaux diversifiés, hors du métier de base. Le risque réside dans la dépendance de la performance de production par rapport à une structure extérieure et dans la perte d'un savoir-faire stratégique.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

8.5 Gestion de la sécurité : les aspects réglementaires de la maintenance

8.5.1 Législation et cadre réglementaire

❑ La maintenance et la réglementation

L'un des aspects les plus positifs du métier « maintenance » est la liberté que la délégation de responsabilité et d'initiative donne aux responsables : innover et expérimenter pour toujours améliorer l'efficacité du service. Cette liberté a des bornes : ils doivent exercer leur liberté dans un cadre légal et la difficulté est parfois d'appréhender les frontières entre les règles impératives, les contraintes spécifiques et les domaines de libre initiative.

Les services maintenance ont la charge de l'application de la réglementation relative aux équipements qu'ils doivent maintenir, dans l'optique de la sécurité des intervenants, sachant que :

– les matériels utilisés doivent être conformes ou mis en conformité ;
– les situations relatives aux opérations de maintenance, réalisées en interne ou externalisées, doivent être considérées comme dangereuses par nature ;
– la responsabilité pénale de la hiérarchie est engagée pour tout accident du travail consécutif à une opération de maintenance ou à une défaillance d'un appareil soumis à règlement.

Notre ambition dans cet ouvrage est de dresser un panorama des différents domaines soumis à réglementation que le responsable de maintenance a l'occasion de rencontrer. Il va de soi que seule la référence aux textes officiels permet de gérer les problèmes rencontrés.

❑ Origine et hiérarchisation de la législation

La législation concernant la maintenance forme un ensemble de textes complexe et évolutif que le technicien, souvent peu formé à cet aspect, doit cependant connaître et appliquer. Les textes légaux sont fournis par l'imprimerie du *Journal officiel*.

Des administrations et des organismes agréés de contrôle peuvent fournir des renseignements et des conseils : citons Véritas, Apave, Ascert, Socotec, LNE, LLOYD, INRS, CRAM, AFAQ, etc.

☐ Origine des textes

– L'Union européenne, dont les directives économiques et sociales sont transposées dans le droit français.
– Le ministère du Travail et de la protection sociale.
– Le ministère de l'Industrie.
– Le ministère de l'Environnement.

☐ Hiérarchisation des textes

– Les directives-cadres européennes, édictées par le conseil des ministres après consultation du Parlement européen. Le traité de Rome, par son article 100A, est

à l'origine de la directive économique ; par son article 118A, il est à l'origine de la directive sociale.

– Les lois, promulguées par le Parlement français, donnent les orientations générales et les objectifs. Elles ne peuvent être modifiées ou abrogées que par d'autres lois.
– Les décrets d'application sont pris par l'exécutif dans le cadre d'une loi. Ils peuvent être modifiés ou abrogés par le gouvernement.
– Les arrêtés définissent les modalités de mise en œuvre. Les arrêtés peuvent être ministériels, préfectoraux ou municipaux.
– Les décisions ministérielles sont relatives à un point de détail précisé.
– Les circulaires ministérielles commentent et expliquent les décrets et les arrêtés.
– Les circulaires d'organismes d'État, telle la Sécurité sociale par exemple.
– Les règles conventionnelles comprennent les documents normatifs.

Notons que, si les normes ISO, CEN, AFNOR n'ont pas de caractère obligatoire, elles ont valeur de référence et une présomption de conformité à la réglementation.

8.5.2 Directives machines : obligation des constructeurs

❑ Les directives machines

□ La directive machine 89/392/CEE

Elle définit les exigences essentielles concernant la conception et la fabrication des installations automatisées, ainsi que les composants de sécurité (barrières immatérielles, commandes bimanuelles). L'intégration de la sécurité à la conception est l'approche fondamentale de cette directive : « les machines doivent par construction être aptes à assurer leur fonction et à être réglées et entretenues sans que les personnes ne soient exposées à un risque, lorsque ces opérations sont effectuées dans les conditions prévues par le fabricant ». Les conditions anormales prévisibles doivent aussi être étudiées à la conception.

□ Les directives complémentaires

89/686/CEE est relative à la conception des équipements de protection individuelle.

91/368/CEE concerne les machines mobiles (engins de chantier, appareils de levage).

93/44/CEE concerne les équipements de levage des personnes.

73/23/CEE concerne les risques électriques.

93/68/CEE concerne le marquage CE.

❑ Obligations des constructeurs

Une classification des machines suivant leur dangerosité précise les règles techniques à appliquer et la procédure de certification.

Les machines neuves les plus dangereuses (scies, presses, machines de moulage, etc.) sont soumises à la procédure d'examen CE : un organisme habilité atteste que la machine satisfait les règles techniques la concernant (article R. 233/86).

Les machines non réputées les plus dangereuses sont soumises à « l'autocertification CE » : le fabricant ou l'importateur déclare sous sa responsabilité que la machine

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

(ou le moyen de protection) est conforme aux règles techniques. Il doit constituer un dossier technique d'autocertification (article R. 233/83).

Un marquage constitué d'un sigle CE doit être apposé sur l'équipement (voir, par exemple, D. Lohbeck, *Guide du marquage CE. Basse tension, CEM, Machines*, Dunod, 1999).

8.5.3 Directives sociales : obligation des utilisateurs

❑ **Les directives d'utilisation**

89/391/CEE est la directive générale des mesures de prévention à prendre pour améliorer le milieu de travail, la santé et la sécurité des travailleurs.

89/655/CEE concerne l'utilisation des équipements de travail.

89/656/CEE concerne l'utilisation des équipements de protection individuelle.

❑ **Obligations des utilisateurs**

□ **Prescriptions techniques pour l'utilisation des équipements**

Ces prescriptions sont des mesures de sécurité se rapportant aux éléments mobiles, aux protecteurs, aux mises en marche, à la signalisation destinée aux opérateurs, aux risques (de rupture, de chutes ou de projection d'objets, de brûlure, d'incendie et électrique), à l'éclairage, à l'isolement de la source d'énergie et à l'arrêt d'urgence.

□ **Mise en conformité des équipements anciens**

L'article 7 du décret 93-40 du 11 janvier 1993 est la transposition en droit français de la directive 89/655/CEE. Cet article précise qu'un « plan de mise en conformité » des équipements anciens doit être élaboré par le chef d'établissement pour le 30 juin 1995, ou plus tard après demande de dérogation. Pour chaque équipement, le plan précise article par article le détail des travaux à réaliser, la date et le coût des travaux.

Cas de l'acquisition d'une machine non marquée CE :

– si l'utilisateur achète une machine neuve ou d'occasion construite hors de l'Union européenne, il doit effectuer sa mise en conformité ;
– un vendeur, ou un importateur de machine sans marquage CE doit la mettre en conformité ;
– un rénovateur achetant une machine d'occasion doit la revendre en conformité ;
– un loueur ne peut proposer que des machines conformes ;
– un utilisateur construisant lui-même une machine doit l'autocertifier ou, si c'est une machine réputée dangereuse, la présenter à l'examen CE.

□ **Organisation, mise en œuvre et utilisation des équipements et moyens de protection**

Les directives précisent les modalités de mise à disposition des matériels adaptés et des équipements de protection individuelle des travailleurs, ainsi que les modalités de formation et d'information.

8.5.4 Domaines réglementés : les contrôles périodiques réglementaires

Un nombre important d'appareils, de machines et d'installations doivent être soumis à des contrôles et des vérifications périodiques obligatoires réalisés par des organismes agréés (Drire, Apave, etc.).

Il appartient au responsable de maintenance de les gérer en les intégrant dans le plan de maintenance systématique de l'équipement, mais en veillant à ce que la planification de ces contrôles soit respectée (caractère impératif) et à ce que la « traçabilité » de ces contrôles soit totale. Il lui appartient également de se procurer l'ensemble des textes officiels à jour concernant tous les équipements soumis à règlements particuliers dont il a la maîtrise.

❑ Les différents domaines réglementés

La réglementation prévoit la conformité initiale ou la mise en conformité des autorisations initiales de mises en service et des procédures de réception des installations : nous ne décrirons que quelques aspects réglementaires « en cours d'exploitation ».

□ Appareils à pression de vapeur

Ce sont les générateurs (chaudières), les récepteurs et les canalisations assurant la liaison entre appareils. Les épreuves se font généralement à 1,5 fois la pression nominale (le timbre).

Une visite réglementaire est prévue tous les 18 mois maximum, une épreuve hydraulique précédée d'une visite complète est prévue tous les 10 ans. Le contrôle du bon fonctionnement des dispositifs de sécurité des chaufferies sous pression doit être effectué tous les ans.

□ Appareils à pression de gaz

Beaucoup de règlements spécifiques à se procurer. Visite complète à l'arrêt tous les 3 ans, réépreuve de 5 à 10 ans suivant les types de gaz et d'appareils.

□ Installations thermiques

Vérifications techniques annuelles, visites approfondies des installations consommant de l'énergie thermique tous les 3 ans, mesures de la concentration des effluents tous les 2 ans.

□ Installations électriques

Il est obligatoire de contrôler le réseau public jusqu'aux équipements. Par contre, il n'y a pas d'obligation légale pour l'équilibrage des phases, mais des pénalités. L'utilisateur est responsable de la caractérisation de « l'ambiance » (matériel antidéflagrant). Sécurité du public : suivant les installations, les arrêtés prévoient des contrôles de 1 à 3 ans. Sécurité des travailleurs : périodicité annuelle pour toute installation.

□ Appareils de levage et de manutention

Le Code du travail (R. 233/11) prévoit des contrôles annuels, sauf pour les élévateurs de postes de travail et les hayons élévateurs ramenés à 6 mois. Sont concernés les ascenseurs et monte-charges, les portes automatiques, les escaliers mécaniques

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

et les trottoirs roulants, les portiques et ponts roulants, les chariots élévateurs et grues automobiles, les treuils et palans, les monorails, etc. À noter le cas des élingues, qui doivent être détruites lorsque contrôlées hors d'usage.

☐ **Machines dangereuses**

Le Code du travail (R. 233/11) définit les machines dangereuses, pour lesquelles des visites sont imposées, certaines périodicités de contrôle étant abaissées à 3 mois. L'article R. 233/86 liste les machines neuves considérées comme les plus dangereuses. Ce sont :

– les scies circulaires et à ruban à chargement ou déplacement manuel (travail du bois, de plastiques ou de produits alimentaires surgelés) ;
– les toupies, dégauchisseuses, raboteuses à avance manuelle (machines à bois) ;
– les presses pour le travail à froid des métaux à chargement manuel ;
– les machines de moulage des plastiques et du caoutchouc à chargement manuel.

Certains outillages, tels que les machines électriques portatives > 750 W, les échelles portatives, les élingues, les chalumeaux et ses accessoires (détendeur, clapet antiretour), etc., ainsi que les équipements de protection individuelle sont également soumis à des vérifications périodiques.

☐ **Autres domaines réglementés**

Les rayonnements ionisants, les gaz combustibles, les produits pétroliers (stockage et utilisation), les fluides médicaux font l'objet de réglementations particulières. La réglementation concerne aussi les travaux effectués par des entreprises extérieures (voir § 8.5.5) et les formations obligatoires :

– habilitations électriques,
– caristes et manutentionnaires,
– opérateurs sur autoclaves et conducteurs de chaufferie,
– CHSCT (4 réunions par an pour plus de 50 salariés),
– sécurité incendie, etc.

❑ **Au-delà de la réglementation…**

La réglementation a pour objet la sécurité des exploitants dans des conditions normales de fonctionnement. Il est nécessaire de rappeler que les techniciens de maintenance sont appelés à intervenir dans des circonstances exceptionnelles liées à des défaillances fortuites. La responsabilité des préparateurs est engagée pour toute « situation dangereuse » définie par la norme CEN 292/1 comme « toute situation dans laquelle une personne est exposée à un ou plusieurs risques ».

Bien que les directives européennes stipulent que les équipements « doivent être conçus et construits de façon que […] leur maintenance n'expose pas les personnes à un risque d'atteinte corporelle ou à leur santé », bien que le décret 93.41 du 11 janvier 1993 stipule que « le chef d'établissement doit informer de manière appropriée les travailleurs chargés de […] la maintenance des équipements », il reste à toujours évaluer et maîtriser les risques liés aux opérations de maintenance.

Nous recommandons la brochure (INR 94) rédigée par la CRAM et l'INRS, intitulée *Maintenance et maîtrise du risque*, qui propose une démarche rationnelle d'analyse des risques en maintenance.

8.5.5 Quelques aspects réglementaires concernant la sous-traitance

❑ Obligations concernant la main-d'œuvre extérieure

Le recours à des entreprises extérieures peut engendrer deux problèmes spécifiques évoqués dans le Code du travail : le délit de marchandage et le travail clandestin. Le risque existe dès lors que le prestataire met à disposition permanente du donneur d'ordre un ou plusieurs de ses salariés.

□ Délit de marchandage

Les articles L. 125/1 et L. 125/3 du Code du travail précisent :

« toute opération à but lucratif de fourniture de main-d'œuvre qui a pour effet de causer un préjudice au salarié qu'elle concerne, ou d'éluder l'application des dispositions de la loi, de règlement, de convention ou d'accord collectif de travail, *ou marchandage*, est interdite » ;

« toute opération à but lucratif ayant pour objet exclusif le prêt de main-d'œuvre est interdite dès lors qu'elle n'est pas effectuée dans le cadre des dispositions du présent code […] ».

Cas des prestations en régie

Non interdites, mais dangereuses, car l'état de subordination des salariés « en régie » (taux horaires inférieurs à ceux de la dépense contrôlée) fait courir un risque pénal au chef d'entreprise en cas d'accident du travail.

Cas des prestations en dépenses contrôlées

Pratiques fréquentes, mais parfois jugées comme contournant la loi dans certains cas, tels que :

– le recours continu à du personnel d'exécution pour des prestations diverses sans rapport avec l'objet social de l'entreprise extérieure ;
– l'état de dépendance économique de l'entreprise extérieure ;
– tout contrat comportant une clause : « mise à disposition de… ».

Cas du recours aux entreprises de travail temporaire

La loi 90.613 du 12 juillet 1990 prévoit que l'appel aux salariés d'entreprises de travail temporaire ne peut se faire que pour des tâches non durables (missions) liées à un accroissement temporaire de l'activité ou au remplacement d'un salarié absent.

□ Travail clandestin

Le donneur d'ordre a l'obligation de contrôler que le personnel utilisé par le prestataire n'est pas en situation de travail clandestin. L'article L. 324.10 du Code du travail indique : « Est réputé clandestin l'exercice à but lucratif d'une activité de […] prestation de service par toute personne physique ou morale qui s'est soustraite intentionnellement à l'une quelconque des obligations suivantes :

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

1. requérir son immatriculation au répertoire des métiers ou au registre du commerce et des sociétés ;

2. procéder aux déclarations exigées par les organisations de protection sociale et par l'administration fiscale ;

3. en cas d'emploi de salariés, effectuer au moins deux des formalités prévues parmi : la remise d'un bulletin de paie, la tenue du livre de paie, la tenue du registre unique du personnel. »

❑ **Plan de prévention des travaux dangereux externalisés**

Le décret 92.158 du 20 février 1992 traite le cas d'entreprises extérieures réalisant des prestations chez un utilisateur. Le chef de l'entreprise utilisatrice a la responsabilité d'un plan de prévention des risques liés à l'interférence du « chantier extérieur » avec les activités internes.

Un plan de prévention doit également être établi par écrit pour tous les travaux réputés dangereux et listés dans l'arrêté du 19 mars 1993, dont nous extrayons quelques travaux fréquents en maintenance :

– travaux effectués sur une installation classée faisant l'objet d'un plan d'opération interne ;
– travaux de maintenance sur les équipements de travail, autres que les appareils et accessoires de levage, qui doivent faire l'objet des vérifications périodiques prévues à l'article R. 233/11 du Code du travail ;
– travaux de maintenance sur installations à très haute ou très basse température ;
– travaux comportant le recours à des ponts roulants ou transtockeurs ;
– travaux de montage ou de démontage d'éléments préfabriqués lourds […] ;
– travaux de démolition ;
– travaux dans ou sur des cuves […] ou en atmosphère confinée ;
– travaux de soudage oxyacétylénique exigeant le recours à un permis de feu.

L'article R. 237/7 du Code du travail propose une trame d'établissement d'un plan de prévention :

– identification de l'opération et des intervenants ;
– définition des phases d'activité dangereuse et des mesures préventives ;
– instructions communiquées aux salariés ;
– consignes de premier secours ;
– procédures d'utilisation et d'entretien des différents matériels ;
– listes des membres ayant effectué les visites préalables ;
– approbation du plan de prévention et du règlement sécurité, visé par toutes les parties.

8.5.6 La maintenance et l'environnement

Toutes les entreprises publiques ou privées ont un impact plus ou moins important sur l'environnement, soit par leur activité propre, soit par l'activité induite, transport par exemple. D'où la loi 76.663 du 19 juillet 1976, qui proposait un classement des installations en quatre familles, allant des « activités sans danger particulier » à celles

« dont l'impact sur l'environnement est considéré comme potentiellement à haut risque », installations dites « Seveso ».

Le décret 96.197 du 11 mars 1997 a modifié la nomenclature des installations classées. La législation est actuellement révisée à partir de la loi du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement, certaines catégories classées « sous régime de déclaration » devant être soumises à des contrôles techniques par des organismes agréés.

D'autre part, le règlement européen « Éco-audit » couvre tous les aspects environnementaux d'un site industriel, en instituant une obligation de transparence du système de management environnemental avec diffusion dans le public.

La commission européenne a reconnu la norme ISO 14001 comme moyen d'application du management environnemental, bien que la certification ISO 14001 n'exige pas la communication au public.

« Éco-audit » marque la tendance à intégrer aux préoccupations industrielles la gestion de l'environnement comme fonction à part entière.

8.6 Assurer la maîtrise des risques industriels

8.6.1 Au-delà de la réglementation…

Respecter la réglementation est nécessaire, mais ce n'est pas suffisant.

La réglementation a pour objet la sécurité des exploitants dans des conditions normales de fonctionnement.

Il est nécessaire de rappeler que les techniciens de maintenance sont appelés à intervenir dans des circonstances exceptionnelles liées à des défaillances fortuites. La responsabilité des préparateurs est engagée pour toute « situation dangereuse » définie par la norme CEN 292/1 comme « toute situation dans laquelle une personne est exposée à un ou plusieurs risques ».

Bien que les directives européennes stipulent que les équipements « doivent être conçus et construits de façon que […] leur *maintenance* n'expose pas les personnes à un risque d'atteinte corporelle ou à leur santé », le décret 93.41 du 11 janvier 1993 stipule que « le chef d'établissement doit informer de manière appropriée les travailleurs chargés de […] la *maintenance* des équipements », il reste à toujours évaluer et maîtriser les risques liés aux opérations de maintenance.

Nous recommandons la brochure (INR 94) rédigée par la CRAM et l'INRS intitulée « Maintenance et maîtrise du risque » qui propose une démarche rationnelle d'analyse des risques en maintenance.

❑ Danger d'un système

Le danger est le « *répertoire des événements redoutés* » qu'un système source peut engendrer portant atteinte :

– aux biens,

– aux personnes,

– à l'environnement.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Le danger peut être aléatoire (origine naturelle, technologique ou économique) ou déterministe (menace de malveillance). La « cindynique » est la science du danger.

❑ **Danger d'un système « en maintenance »**

Les situations relatives aux opérations de maintenance doivent être considérées comme « dangereuses par nature » (ce qui est confirmé par les statistiques d'accidents du travail, des maladies professionnelles et les expertises d'analyses de catastrophes).

En effet, dans le cadre de la maîtrise du risque industriel, elles présentent deux caractères particuliers :

– la sécurité intégrée prévue par le concepteur est souvent « neutralisée » car inadaptée en phase de maintenance (exemple du travail « sous tension »);
– lors des interventions correctives, les impératifs de disponibilité créent une situation de stress pour les techniciens, donc d'augmentation du risque.

De plus, les opérations de maintenance se rapportent parfois à des installations « à haut risque », en fonctionnement normal ou dégradé.

❑ **Maintenance préventive et maîtrise des risques**

La maintenance préventive ayant pour objet de diminuer le risque de pannes, les agents des méthodes de maintenance doivent être formés pour assurer la maîtrise des risques dérivant d'une panne : défaut qualité, impact environnemental ou accident suivant la méthodologie :

1. Description de la situation en début d'intervention (connaissance de la zone, des accès, du système et de la réglementation en vigueur).
2. Identification des risques, à partir de l'identification des énergies, de l'ambiance (luminosité, bruit, atmosphère…) et des informations disponibles.
3. Définition des mesures de prévention des risques identifiés.

8.6.2 Les concepts de la maîtrise du risque

❑ **Sécurité des systèmes**

Elle se définit par « l'aptitude à ne pas engendrer de danger ». L'objectif global de sécurité détermine la frontière entre les risques acceptables et non acceptables. Entre ces deux zones, il est naturel de réserver une « marge de sécurité » correspondant à une zone d'amélioration à étudier.

❑ **Risque d'un événement redouté *E***

Le risque est une quantification du danger. Il se détermine par le couple (p, g) :

p = probabilité de E (*mesure* de l'occurrence d'un événement)

g = gravité de E (*estimation* de la gravité de ses conséquences)

L'estimation du risque est à la base de la définition des mesures de sécurité à mettre en œuvre. Le diagramme (p, g) se nomme l'*espace du risque*. Il est dit « diagramme de Farmer » en aéronautique.

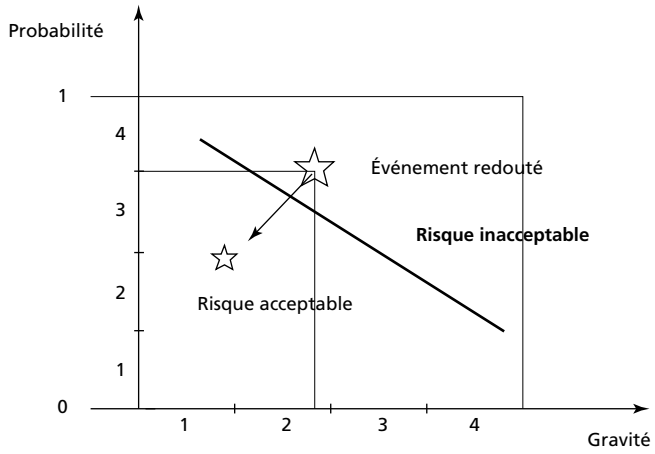


Figure 8.13

Le vecteur permettant de maîtriser le risque lié à un événement redouté a deux composantes :

– la *prévention* est la diminution de la probabilité ;

– la *protection* est la diminution de la gravité.

❑ Sécurité absolue ou risque acceptable ?

La sécurité absolue d'un système est un mythe.

Sécurité absolue = risque nul = utopie **irréaliste**	Objectif sécurité = risque acceptable
Elle suppose la maîtrise de toutes les défaillances, des erreurs humaines et des agressions externes	Il est fonction des efforts financiers et techniques **réalistes** consentis

❑ Domaines de connaissance et d'ignorance

Le domaine de connaissance d'un système permet la description :

– de tous ses états de fonctionnement ;

– de tous ses états de dysfonctionnement ;

– des contraintes de l'environnement dans lequel il évolue ;

– de l'impact de son fonctionnement et de ses dysfonctionnements sur son environnement.

Le domaine de connaissance se divise en une *zone de certitude*, correspondant à une connaissance déterministe de tous ses états (lois physiques ou connaissance statistique moyenne) et en une *zone d'incertitude* (connaissance aléatoire des états dans une situation donnée).

Le domaine d'ignorance correspond à l'impossibilité de décrire des événements par leurs états. Notons qu'il est vain de vouloir probabiliser l'inconnu (événement mal défini qualitativement).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

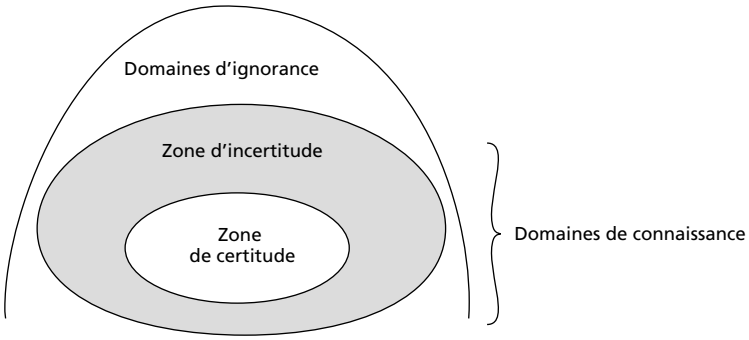


Figure 8.14

La prise de décision dans le domaine d'incertitude repose sur le principe de *certitude pratique* qui s'énonce comme suit : « Si la probabilité d'un événement *E* dans une expérience donnée est suffisamment petite, on peut être presque certain que lorsque l'expérience est réalisée une seule fois, alors l'événement n'aura pas lieu ». Ce qui s'exprime en sécurité des systèmes par le concept d'*événement rare* : « C'est un événement pouvant entraîner des conséquences graves, mais dont les décisions prises (volontaires ou réglementaires) assignent une probabilité très faible ». Ce concept doit être une des bases de la rédaction des procédures d'assurance qualité.

8.6.3 Les outils de la maîtrise des risques

Ils sont communs avec ceux de la sûreté de fonctionnement, souvent présentés dans les ouvrages sur la qualité, et nous avons traité l'AMDEC et l'arbre de défaillance (FTA pour *Fault Tree Analysis*) dans le chapitre 4 (§ 4.5, analyse prévisionnelles des défaillances).

Citons deux types d'analyses inductives proches de l'AMDEC dans leur démarche et dédiées à la prévention des risques : l'HAZOP et l'APR.

❑ La méthode HAZOP

La méthode HAZOP (*Hazard and operability study*) a été développée pour l'industrie chimique anglaise en 1964, puis publiée par H.G. Lawley en 1973. Elle est spécifiquement adaptée aux processus traitant des matériaux fluides.

C'est *une méthode d'identification des dangers inhérents à une installation*, donc susceptibles de nuire à son bon fonctionnement.

□ Préalables à la méthode

Le système à traiter est un circuit fluide qu'il importe de délimiter et de bien connaître : fluides véhiculés et matériels utilisés (schémas du process, plans des tuyauteries et des matériels), procédures d'exploitation, de maintenance et de sécurité. Les matériels comprennent classiquement des vannes, clapets, soupapes, pompes, capteurs…

□ Mise en œuvre

À l'analyse fonctionnelle classique seront associés l'état des matériels (en marche, ouvert…) et les variations des paramètres de fonctionnement (débit, pression, température, niveau, composition).

La méthode consiste à remplir un tableau d'analyse en utilisant des mots clés caractérisant des écarts par rapport à la normalité. Quelques mots clés : None (pas de) ; More off (trop de) ; Less off (moins de) ; Part off (autant de) ; More than (plus de) ; Other (autre).

La formalisation se fait au moyen d'un tableau d'analyse (tableau 8.6). Pour chaque variation de paramètre, la colonne « Causes » permet de recenser les défaillances de matériels explicatives (lois thermohydrauliques). La colonne « Conséquences » permet de rechercher les effets sur le process, en tenant compte des protections existantes.

Tableau 8.6 – Exemple de tableau d'analyse par la méthode HAZOP

Mot clé	Déviation	Causes possibles	Conséquences	Corrections envisagées
Less off	moins de débit, moins de température	×	×	×

❑ L'analyse préliminaire des risques (APR)

Cette méthode est centrée sur la sécurité, par identification des phénomènes, des situations et des événements susceptibles de causer un dommage corporel. Elle précède logiquement l'AMDEC, car elle va permettre l'identification des sous-systèmes dangereux. Le tableau 8.7 donne un exemple de tableau d'analyse relatif à un chariot élévateur.

Tableau 8.7 – Tableau d'analyse de l'APR

Fonction	Phase	Entité dangereuse	Situation dangereuse	Cause de la situation événement	Accident potentiel	Barrières de sécurité
Mouvement chariot	Roulage	Obstacles sur la piste	Choc facial	Dépose imprévue	Déséquilibre de la charge	Prévoir un déflecteur

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Autres méthodes d'identification des risques

Outre l'AMDEC, d'autres méthodes de sécurisation existent. Citons la simple et rapide *check list* qui est un aide-mémoire sous forme d'un questionnaire et le *what if*, revue qui consiste à répondre aux questions de type « Qu'arriverait-il si… », par exemple, « Qu'arriverait-il si le réservoir monte en pression ? si l'acide est trop dilué ? si la vanne ne s'ouvre pas ? »

Ces méthodes ont en commun de reposer sur l'expérience d'un groupe multidisciplinaire d'experts des process concernés, parmi lesquels les hommes de maintenance sont indispensables. Leur efficacité dépend de la bonne organisation des groupes de travail.

Remarque

Ces outils peuvent être mis en œuvre pendant la conception, avant la mise en service ou en phase d'exploitation.

8.6.4 Conclusion

Défions-nous des impératifs de rentabilité immédiate alors que le capital de production est engagé sur dix, vingt ans ou plus.

Comme l'exprime Claude Pichot, « le propriétaire d'une installation est également propriétaire des risques associés… ». Parce que le risque zéro n'existe pas, parce que l'incertitude demeure, il ne semble plus concevable aujourd'hui de vouloir exploiter un équipement sans avoir fait un inventaire exhaustif de tous les risques ni avoir examiné toutes leurs conséquences. Cette analyse préliminaire débouche sur la définition et la mise en œuvre des mesures qui permettront d'éviter des pertes économiques, des atteintes environnementales, des maladies ou des lésions, voire des catastrophes.

La maintenance, par sa connaissance intime des équipements et de leurs problèmes, est un acteur incontournable de la maîtrise du risque.

D

Management et organisation de la maintenance

9 • LE MANAGEMENT : LES OBJECTIFS PROPRES À LA MAINTENANCE

9.1 Élaborer son projet « maintenance »

9.1.1 Définitions

❑ **Management de la maintenance**

« Toutes les activités des instances de direction qui déterminent les objectifs, la stratégie et les responsabilités concernant la maintenance et qui les mettent en application par des moyens tels que la planification, la maîtrise de la maintenance, l'amélioration des méthodes dans l'entreprise y compris dans les aspects économiques. »

❑ **Objectif de maintenance**

« Buts fixés ou acceptés par la Direction et le service maintenance. Ces buts peuvent comprendre la disponibilité, la réduction des coûts, la qualité du produit, la protection de l'environnement, la sécurité. »

❑ **Stratégie de maintenance**

« Méthode de management utilisée en vue d'atteindre les objectifs de maintenance. »

9.1.2 Management : le choix des objectifs

❑ **Réflexion préliminaire : la « dialogique d'objectifs »**

☐ **Visions à long terme contre vision à court terme**

Le rêve de tout décideur d'entreprise est de promouvoir une maintenance moins dépensière et plus efficace. Mais ce même décideur pratique trop souvent une gestion à court terme, le regard fixé sur le compte d'exploitation de l'année. Or ni la maintenance du parc, ni les investissements liés à la mutation des compétences, ni le développement de projets restructurants ne sont prioritaires ni même rentables dans une vision à court terme.

Pourtant, les actions à mener sur les équipements comme sur les compétences, ainsi que le déploiement de nouvelles organisations représentent des enjeux sur le futur proche : les négliger se paiera cher ultérieurement. Bien des responsables de

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

maintenance en sont conscients, sachant que le matériel dont ils ont la responsabilité est engagé pour 10, 15 ans ou plus.

Par contre, certains dirigeants d'entreprises, en PME spécialement, n'ont pas la même conscience du coût du cycle de vie d'une installation. Ils sous-estiment souvent l'impact d'une bonne maintenance sur l'efficacité et la durabilité du capital productif.

☐ À propos des « dialogiques »

Edgar Morin nomme « dialogiques » des logiques antagonistes et difficilement conciliables, mais que le management doit inexorablement concilier. En maintenance, il en va ainsi de l'objectif « réduire les dépenses de maintenance » avec l'objectif « augmenter la disponibilité » ou de l'objectif à court terme « investir au moindre coût » avec l'objectif à long terme « optimiser le coût global de possession ».

☐ L'incalculable retour sur investissement

Un autre aspect de ce problème est que le coût de développement de beaucoup de projets (plan de préventif, programme TPM, projet GMAO par exemple) est chiffrable, alors que les gains attendus à moyen terme sont aussi indiscutables qu'ils ne sont pas facilement chiffrables pour un esprit comptable. Pour illustrer ce problème, c'est comme le budget d'une campagne publicitaire que l'on connaît au centime près, et l'apport de cette campagne que l'on sait être bénéfique par bien des aspects, mais que l'on ne sait pas comptabiliser.

❑ Les deux objectifs fondamentaux de la maintenance

Nous pouvons identifier deux objectifs majeurs de maintien d'un site de production :

– l'un est à dominante économique : *réduire les dépenses* et à travers elles, le budget du service ;

– l'autre est à dominante opérationnelle : *améliorer la disponibilité* du système productif et à travers elle, la productivité.

Ces deux objectifs seront analysés indépendamment, en les considérant a priori comme incompatibles afin de mieux pouvoir identifier les leviers d'action propres à chacun, sans oublier qu'une méthode de « compromis dialogique » comme la MBF (voir § 10.3) se donne pour objectif d'obtenir plus d'efficacité au moindre coût.

Autre aspect : ces deux objectifs peuvent se succéder (cas d'une surcapacité de production suivie d'une période surchargée par exemple), ou peuvent coexister sur des équipements d'environnements économiques différents.

Les deux objectifs supposent en commun la maîtrise technique de l'outil de travail, ainsi que la définition d'indicateurs qui permettent de mesurer objectivement les progrès attendus et obtenus.

Le graphe « économique » de la figure 9.1 illustre chacun des deux objectifs possibles, ainsi que leur incompatibilité de principe, sinon de fait.

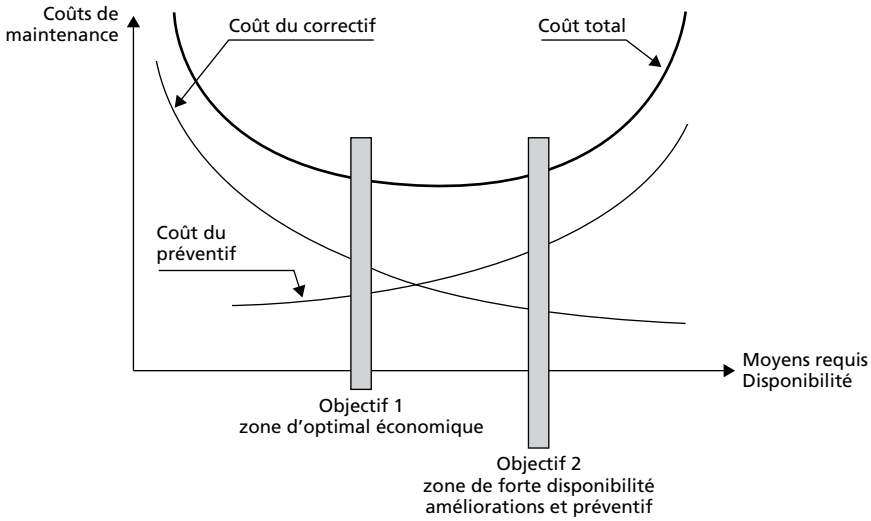


Figure 9.1 – Les deux objectifs possibles de maintenance d'un équipement

« Réduire les dépenses » de maintenance consiste à optimiser les coûts directs des moyens mis en œuvre pour maintenir une installation, c'est-à-dire choisir le niveau de préventif qui optimise le coût total. Mais le coût total direct n'intègre pas les coûts des conséquences des défaillances qui justifient souvent l'objectif « plus de disponibilité », donc plus de préventif et d'amélioration. Cette performance ne s'obtient malheureusement pas au coût direct minimal.

❑ Autres objectifs possibles

Nous allons recenser les autres objectifs spécifiques analysés au long de cet ouvrage, qui peuvent concerner la maintenance à certains moments de la vie de l'entreprise soumise à des contraintes cycliques. Suivant leur nature, ces objectifs peuvent faire l'objet de projets à moyen ou long terme. Pour exemples :

– objectif initial (§ 1.1) : sortir du cercle vicieux de l'entretien « plus il y a de pannes, plus je cours ; plus je cours, plus il y a de pannes » ;
– objectif réglementaire (§ 8.5) : se mettre en conformité avec des aspects réglementaires liés au secteur d'activité ;
– objectif sécuritaire (§ 8.5) : assurer la sécurité des biens, des hommes de maintenance, des utilisateurs ou des usagers ;
– objectif « qualité » (§ 9.3) : rechercher une certification ISO 9000 ou l'agrément d'un client important ;
– objectif « environnement » (§ 9.3) : tout mettre en œuvre pour respecter l'environnement et/ou recherche de la certification ISO 14000 ;
– objectif patrimonial (§ 9.4) : conserver le système productif en état de durabilité exceptionnelle ;
– objectif commercial (§ 7.5) : avoir des installations d'une propreté irréprochable à des fins commerciales (visites ou audits) ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– objectif « qualité totale » (§ 10.2) : apporter la contribution de la maintenance à un projet « qualité totale » d'entreprise, en général par la mise en œuvre d'un projet TPM.

Ce dernier projet dépasse le cadre de la maintenance, mais il sera développé au paragraphe 10.2, car il propose un modèle d'innovation organisationnelle et sociale auquel peu d'entreprises, même petites, pourront échapper pour garder leur compétitivité.

Nous avons omis volontairement le projet GMAO, qui doit être développé comme tout projet, mais qui ne doit pas être une fin en soi : la GMAO n'est qu'une boîte vide au départ, un outil à développer au service d'une volonté de traçabilité, de maîtrise des activités et des coûts, ou de pérennisation d'une organisation nouvelle.

Quel que soit l'objectif retenu, il est toujours mobilisateur de cibler l'activité des équipes de maintenance à partir d'un projet clairement défini et identifié par tous.

9.1.3 Conduite du projet

La mise en œuvre de chacun des objectifs ci-dessus implique de conduire un projet qui ne concerne pas seulement les techniciens de maintenance, mais souvent aussi la production. Beaucoup de ces projets sont sensibles, car ils demandent une implication forte de ses acteurs. Ils engagent donc la hiérarchie technicienne, mais aussi la direction des ressources humaines, cela sur la durée, plus de cinq ans pour un projet TPM avant labellisation.

Ces projets ne doivent pas se superposer, sous peine de confusion et d'échec : nous avons vu un projet TPM ambitieux capoter la troisième année, parce que la direction a changé de cible, la certification ISO 9002 devenant l'objectif prioritaire. Chaque projet doit être accompagné d'un plan de communication dont l'affichage opérationnel, sur le site, permet à tous les acteurs de suivre l'évolution et les résultats.

❑ Méthodologie

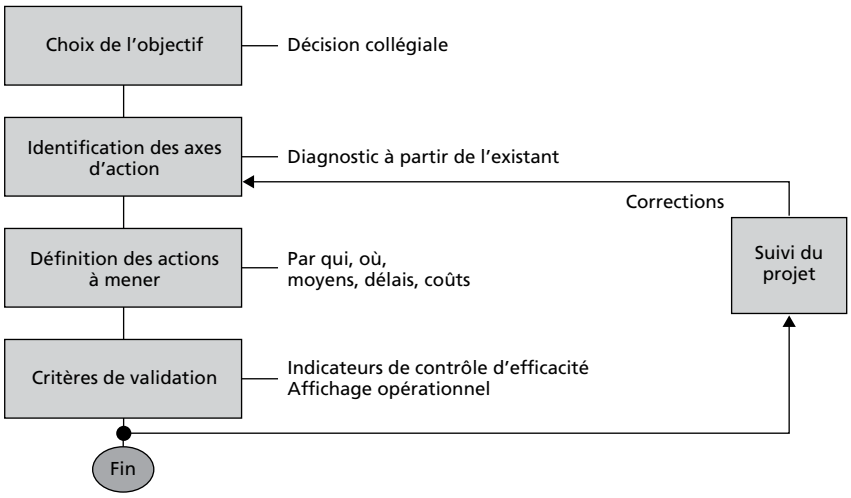


Figure 9.2 – Conduite d'un projet maintenance

Il appartient au management d'identifier clairement et collégialement les objectifs à atteindre par la mise en œuvre d'un projet. La figure 9.2 donne succinctement les étapes à suivre. Une application plus détaillée sera donnée relativement au projet TPM du paragraphe 10.2.

À chaque étape, l'aspect « communication » en direction des acteurs du projet est indispensable pour faire remonter et traiter les dysfonctionnements et pour obtenir leur implication, condition de réussite.

❑ Chronologie de l'implication des acteurs

Il faut avoir à l'esprit que le plus difficile n'est pas d'avoir une très bonne idée novatrice de projet fédérateur, mais d'avoir la détermination nécessaire, appuyée sur une bonne méthodologie, pour engager les phases d'application en accord avec tous les acteurs.

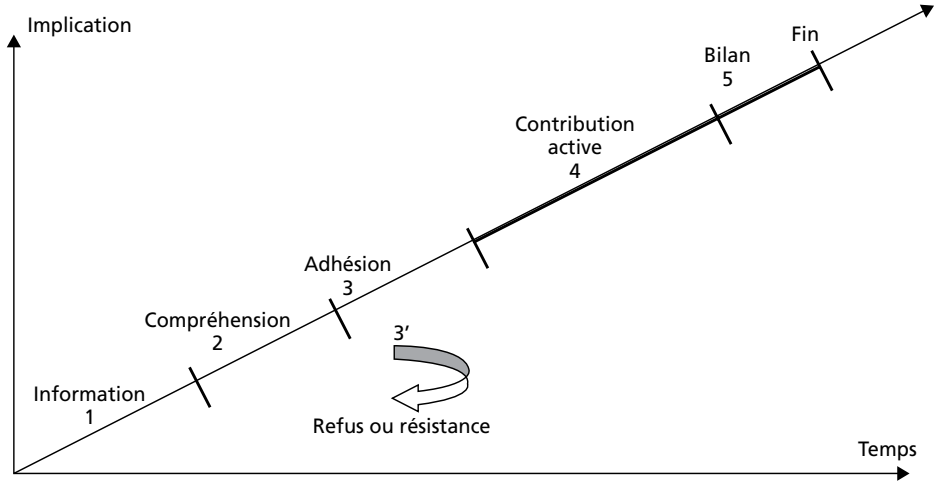


Figure 9.3 – Les phases d'implication des acteurs au long d'un projet

Il est nécessaire que le projet soit connu, compris et accepté par toutes les parties prenantes et qu'il soit animé par un chef de projet qui en assure la cohérence et la bonne fin. En cas de réponse négative (le refus de la phase 3), il faut vérifier que l'information a été suffisante, puis diagnostiquer si le refus est émotionnel (résistance naturelle a priori à tout changement) ou rationnellement motivé.

Il faut aussi tenir compte du profil psychologique des techniciens : celui là est un dépanneur né, il ne se complaît que dans les situations d'urgence où il se valorise, cet autre préfère les tâches préparées et planifiées comme par exemple la maintenance préventive. Le responsable devra donc tenir compte de tous ces éléments en faisant dans une certaine mesure participer les acteurs à la définition du projet, positionnant son comportement quelque part entre la participation compréhensive et la démarche autoritaire.

L'initiation et la conduite de ces dynamiques collectives sont fragiles : elles supposent un grand respect des acteurs (le 0 mépris !), une reconnaissance économique de leurs efforts et une stabilité sociale : le découragement n'est jamais loin et le sentiment d'injustice rôde comme autant de facteurs d'échec. *À ces conditions, le projet est un vecteur de progrès individuel aussi bien que collectif.*

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

9.1.4 Objectif « réduction des dépenses »

❑ **Dans quelles conditions est-il choisi ?**

Le cas le plus fréquent correspond à une surcapacité de production, par rapport à un marché récessif ou par rapport à un produit en fin de vie de distribution. Cet objectif est également le seul possible, à court terme, dans une phase de crise économique pour l'entreprise, ou plus généralement, de compression budgétaire, mais il peut se payer cher à moyen terme. Enfin, cet objectif peut correspondre à un ajustement dans la maîtrise des dépenses liées au respect du budget annuel. En langage imagé de la marine, nous dirons qu'il faut réduire la voilure, ou, de façon plus exacte, qu'il faut « *porter la toile du vent* », c'est-à-dire être réactif.

Attention, cependant, à ce que la réduction des dépenses directes de maintenance ne se fasse pas au détriment de coûts indirects devenant prohibitifs !

❑ **Actions à mettre en œuvre**

Nous allons identifier les axes d'action envisageables, de façon synthétique car les chapitres précédents ont approfondi la plupart de ces pistes d'action. Il faut tout d'abord analyser les postes « budgétivores » des exercices précédents, et avoir à l'esprit qu'une économie substantielle ne sera pas le fruit d'un gisement « miracle », mais le cumul de mesures diversifiées sur les axes suivants.

1. Chasser les gaspillages

– Faire de l'esprit 5 S un objectif privilégié.
– Anticiper les problèmes rencontrés lors des interventions par une préparation minimale, mais efficace.

2. Améliorer la productivité du service

– Planifier les activités, préparer les travaux répétitifs ou importants.
– Ne lancer les activités que lorsque les outillages et autres moyens sont disponibles.
– Mettre en place une démarche diagnostic, condition nécessaire pour réduire la quantité d'interventions trop souvent répétitives.

3. Diminuer le budget achats de la maintenance

– Réduire le nombre de fournisseurs et négocier des marchés prix/volumes.
– Sous-traiter la réalisation de pièces spécifiques, mais réintégrer des travaux sous-traités réalisables en interne de façon plus économique.
– Récupérer des modules en bon état sur des équipements arrêtés.
– Contrôler les achats et simplifier la démarche administrative : déporter les petits achats vers les techniciens, pour gagner en réactivité.

4. Réduire les stocks

– Analyser et programmer les consommations de pièces et de modules.
– Améliorer la standardisation des modules de rechange.
– Améliorer la gestion (rotations et seuils de sécurité) et l'actualiser en exploitant les retours d'expérience.
– Réduire le nombre de pièces en disponibilité permanente, et programmer les commandes.
– Éliminer les articles obsolètes, ou susceptibles de se dégrader.
– Favoriser les stocks chez les fournisseurs (marché avec obligation de délai court).

5. Réduire les dépenses énergétiques

– Sensibiliser les utilisateurs aux gisements d'économie.
– Organiser la chasse aux pertes : fuites, éclairage inutile, fonctionnements à vide, gaspillages de matières.
– Contrôler les ratios consommation/unité.
– Assurer les réglages optimisant les consommations.
– Écrêter les pointes de consommation.

6. Optimiser les équipements et leur usage

– Analyser les équipements budgétivores, et les améliorer.
– Rédiger des consignes d'utilisation (mise en marche, surveillance, fins de poste, etc.).
– Développer l'automaintenance.

7. Optimiser les plans de maintenance préventive

Les plans de systématique sont rarement optimisés (périodes trop courtes, interventions inefficaces ou « luxueuses »), faute d'exploitation économique et technique des retours d'expérience.

8. Transférer des tâches en production

Le transfert des tâches simples de maintenance vers les opérateurs de production allégera le budget du service.

9. Simplifier l'organisation et les fonctionnements

Réduire le nombre de niveaux hiérarchiques : chaque niveau est une interface, chaque interface induit des pertes et des déformations. Déléguer, donner les moyens, contrôler.

Remarque

Ces mesures ne s'excluent pas, mais sont à associer car leurs effets sont complémentaires et parfois synergiques. Certaines auront des effets rapides alors que d'autres ne seront efficaces qu'à moyen terme.

9.1.5 Objectif « amélioration de la disponibilité »

❑ Dans quelles conditions est-il choisi ?

Le cas général est celui d'un système de production de capacité « limite » par rapport à la demande du marché ou dont la productivité est insuffisante, car non optimisée. *Si nous produisons plus et mieux, alors nous vendrons plus*, ou, plus précisément, rendons plus efficace notre outil de production, quantitativement et qualitativement, en diminuant son taux de panne et en améliorant les interventions de maintenance et la logistique. De façon plus analytique, cet objectif peut se rapporter seulement à une machine critique, car « goulot d'étranglement » par exemple.

En fait, c'est une réflexion sur le coût des conséquences d'une panne majeure ou/et le coût des multiples incidents répétitifs qui oriente vers la priorité donnée à la maîtrise de la disponibilité.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Actions à mettre en œuvre

Nous avons vu au paragraphe 5.4 que pour améliorer la disponibilité d'un ensemble productif, en modèle série le plus souvent, il faut cibler (par mesures de D_i) l'équipement le plus pénalisant et améliorer sa disponibilité. Pour rendre plus performant un équipement donné, il existe, par définition de la disponibilité, trois axes d'actions possibles.

– Fiabiliser le matériel : réduire le nombre de pannes et des micropannes en particulier.
– Améliorer la maintenabilité : réduire les durées d'immobilisation, standardiser, rechercher la modularité.
– Rendre la logistique de maintenance plus performante.

Il existe également une obligation d'évaluation : mettre en place un indicateur de mesure de D_{op} (disponibilité opérationnelle).

Remarque

Le potentiel de gain venant d'une meilleure organisation des moyens et des interventions est certainement supérieur au gain à attendre de la réduction du taux de panne : vous ne transformerez pas une machine « faible » techniquement en une machine « fiable » !

Les actions envisageables pour améliorer la disponibilité sont les suivantes.

1. Réduire la fréquence des pannes répétitives

– Sensibiliser les opérateurs à la surveillance active, partie intégrante de l'autonomaintenance, visant par un « soin » constant, à prévenir l'apparition de défaillances majeures (5 S machine).
– Saisir et analyser (groupe d'analyse de pannes) toutes les défaillances répétitives, même mineures.
– Mettre en œuvre une démarche diagnostic de façon à éviter la réapparition de ces microdéfaillances en agissant sur leurs causes.
– Développer la polyvalence des dépanneurs et les former à des méthodes de diagnostic rationnel.
– Dépanner moins vite, mais avec de la qualité, de façon à éviter surtout les dépannages successifs !
– Prévenir les pannes au niveau des utilisateurs (mise en route, consignes d'utilisation, etc.).

2. Fiabiliser le matériel

– Analyser les historiques, sélectionner les équipements critiques et apporter des modifications techniques de façon à éviter les pannes « durables ».
– Choisir des modules interchangeables (échange standard) de performances supérieures en fiabilité.

3. Développer le plan de préventif

– Utiliser les plages hors production pour remettre périodiquement à niveau tout ce qui est défectueux par anticipation des pannes.
– Exploiter les historiques pour optimiser les périodes de maintenance systématique des sous-ensembles.

– Exploiter les AMDEC pour déterminer des défaillances possibles, graves et détectables, que l'on peut donc prévenir en maintenance conditionnelle.
– Préparer une révision, voire une rénovation des équipements les plus pénalisants ou vieillissants.

4. Augmenter l'efficacité des interventions et des travaux

– Raccourcir le circuit des demandes d'intervention (DT) et simplifier leur formulation sur papier ou écran.
– Maintenir les documents techniques à jour et les mettre à disposition des intervenants sur site sous une forme pratique.
– Assurer une préparation efficace, c'est-à-dire minimale, mais utile car anticipant tous les obstacles que les techniciens peuvent rencontrer.
– Planifier les travaux et assurer leur lancement, leur suivi et leur enregistrement.

5. Organiser la logistique de soutien

– Favoriser la modularité : gérer les stocks de modules et minimiser les temps d'arrêt par échanges standard de modules.
– Ne lancer une intervention que si tous les moyens nécessaires sont réunis et disponibles : procédures, outillages, rechanges, etc.

Il faut avoir à l'esprit que la réduction des temps d'intervention ne passe pas par le « travaillez vite » mais par le « travaillez mieux », en chassant le gaspillage que sont toutes les pertes de temps émanant d'un manque de réflexion individuelle et d'un manque d'organisation collective. *Le rôle des méthodes-maintenance est ici prépondérant.*

9.1.6 Synthèse

Obtenir moins de dépenses (objectif 1) ou plus de disponibilité (objectif 2) requiert en commun plus de réflexion (diagnostic, anticipation, refus de la routine, qualité) et une meilleure organisation à tous les niveaux. Remarquons que la méthode MBF (voir § 10.3) obéit à cet objectif d'efficacité à coût maîtrisé.

Dans la même logique, le développement de la fonction méthodes-maintenance a pour objet de rendre la maintenance plus performante tout en évitant l'escalade des moyens. *En maintenance, le qualitatif doit primer le quantitatif.*

9.2 Le management participatif : gage d'efficacité de la maintenance

9.2.1 Ressources humaines : la mutation des compétences, l'émergence de nouveaux métiers

❑ **À l'époque de la PEINE succède l'époque de la PANNE**

La mutation technologique des équipements associée aux nouvelles organisations générées par les contraintes économiques d'un marché irréversiblement mondialisé entraîne une mutation des compétences à l'interface « homme-machine ». Ce sont d'ailleurs plus les nouvelles conceptions de la production, tel le flux tendu,

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

que l'automatisation des tâches qui génèrent le changement. Certains métiers disparaissent (manutention entre postes), beaucoup sont appelés à évoluer, d'autres émergent. Les « turbulences » sociales liées à cette mutation sont à la une de tous les journaux.

Les qualifications nouvelles qui en découlent ne sont pas clairement identifiées, car ces changements ne sont jamais totalement prévisibles, ainsi que leur niveau d'appropriation par les acteurs concernés.

L'entreprise, pour assurer sa fonction de production, utilise de moins en moins d'hommes. Le temps de production « machine » a supplanté, dans tous les pays industrialisés, le temps de production « homme-outil » (le menuisier et son rabot), puis « homme-machine » (le tourneur et son tour).

La quantité et la qualité des produits ou des services mis sur le marché dépendent plus de l'efficacité tirée du système productif par les hommes qui l'entourent que du système lui-même : *soft* ou *hard*, car tous les outils productifs d'un secteur donné deviennent semblables et offrent des performances nominales convergentes.

En rupture avec un passé récent, *la compétitivité viendra donc plus de la qualité des équipes et de leurs organisations que des performances intrinsèques de l'outil productif.* D'autre part, les stratégies « qualité » qui placent les entreprises en position favorable sur leur marché reposent avant tout sur la qualité de leurs équipes. De plus, la mise en pratique des concepts de la productique, dont le flux tendu, montre à la fois leur grande efficacité, mais aussi leur vulnérabilité face à la dimension sociale : la stabilité sociale de l'environnement et un consensus des acteurs en interne sont indispensables.

❑ Profil de l'homme de maintenance

La fonction maintenance, par tous ses aspects, repose sur des activités humaines : on ne fera jamais de bonne maintenance *contre* les hommes du service, mais *avec*. Avec leur motivation, avec leurs compétences, avec leurs initiatives, avec leur esprit d'équipe.

- Motivation, car le respect des objectifs définis par le service maintenance et la recherche de performance de l'outil productif exigent une forte implication personnelle à l'intérieur d'une équipe.
- Compétence, car il n'est pas question de « faire semblant » face à la panne. Cette compétence s'appuie sur une certaine polyvalence technique, et une faculté d'adaptation à des technologies en évolution rapide.
- Initiative, car les fonctions de surveillance « active » et de dépannage, à effectuer « en temps réel », ne sont pas compatibles avec l'attente d'ordres.
- Esprit d'équipe, car le temps du « Zorro-dépanneur » est révolu. En fait c'est l'équipe qui doit avoir une polyvalence telle qu'elle puisse faire face à tous les événements la concernant.

L'aspect « communication » devient essentiel, le devoir d'expression étant à la base de la traçabilité demandée, et la liberté de s'exprimer étant à la base de la recherche d'amélioration, de correction et d'optimisation. Au contraire de la production, la quasi-totalité des temps d'activité en maintenance demeure un « temps-homme »

caractérisé par un besoin de qualité plus que de rendement, ainsi que nous l'avons étudié, voire démontré au paragraphe 6.2.

Nous allons donc analyser plus finement la nature des changements qui concernent l'homme de maintenance, puis le cadre participatif dans lequel toutes les qualités requises énoncées ci-dessus peuvent s'exprimer, dans lequel les organisations nouvelles de la maintenance s'inscrivent inexorablement.

9.2.2 L'homme de maintenance face aux changements

❑ Transformation de l'organisation des services

La trilogie « production, qualité, maintenance » est soumise à une redistribution des rôles au pied de la machine. La prise d'initiative liée à l'action corrective doit se faire « en temps réel » sans chercher à savoir si le dysfonctionnement constaté est du domaine de responsabilité de la production, ou de la qualité, ou de la maintenance. Par contre, en « temps différé », les actions d'analyse et d'amélioration reviendront à la fonction concernée, au niveau des « méthodes » pour la maintenance.

❑ Transformations dans l'organisation du travail

L'émergence de l'importance des tâches de surveillance des équipements implique, de la part des opérateurs, des qualités de polyvalence technologique, un haut niveau de vigilance, l'esprit d'équipe et la faculté d'initiative en fonction de ses possibilités propres : cela fait beaucoup pour un seul homme (!), mais devient réaliste pour une équipe.

De plus ces techniciens seront associés aux recherches d'amélioration ainsi qu'à certains projets. Par exemple, il serait vain de vouloir mettre en œuvre une GMAO sans que les saisies nécessaires soient expliquées et acceptées par les opérateurs. Ce renforcement des compétences pour les conducteurs d'équipement a des répercussions sur le rôle de l'encadrement qui devient plus une tâche d'assistance, de coordination et d'animation que de « commandement ».

❑ Changements dans les formations et les qualifications

La notion de poste de travail, caractérisée par le respect de procédures et l'application d'un savoir-faire bien identifiée, était à la base des qualifications. C'est une requalification reposant à la fois sur d'autres compétences (adaptabilité, polyvalence), d'autres qualités (rigueur, motivation) et d'autres comportements (réactivité) qu'il va falloir définir et réunir au sein d'équipes, afin d'assurer les fonctions de conduite et de maintien d'un système automatisé. Cela ne se fera pas sans un effort de formation important, reposant sur des méthodes pédagogiques, elles aussi innovantes. L'objectif de ces « reconversions » est de favoriser l'adaptation à des fonctions nouvelles : dialogue par clavier-écran ou diagnostic à partir de la compréhension de la logique séquentielle pour prendre deux exemples délicats à traiter à partir d'un niveau d'origine faible.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Le GAF, groupe action-formation, est une démarche pédagogique d'apprentissage progressif à partir des événements du terrain, qui obéit à cet objectif d'adaptation et vise à l'autonomie d'une équipe (voir § 10.5.4).

❑ Changement dans les relations sociales

Il est évident que la gestion de ces changements dépasse le cadre du responsable de la maintenance et exige l'implication de la direction et de la DRH (direction des ressources humaines). Sont remis en cause :

– l'évaluation des performances individuelles, en respectant la cohérence des équipes formées ;
– les classifications, donc les systèmes de rémunération ;
– les fonctions d'encadrement ;
– les systèmes de communication ;
– l'aménagement des horaires de travail.

Les changements organisationnels ne réussiront que si le système d'incitation est reconnu et admis après négociation. Cette négociation concerne évidemment les syndicats traditionnels qui, en France, ont du mal à se situer face à un management participatif. Le climat social de l'entreprise est donc prédominant pour que l'exploitation de l'appareil productif soit optimisée : *il ne suffit pas d'investir, puis d'appuyer sur le bouton « marche »*.

9.2.3 Du management hiérarchique au management participatif

Tous les secteurs industriels avaient à l'origine un mode de management autocratique basé sur l'ordre de travail et l'obéissance à cet ordre émanant d'un chef. Dans la période taylorienne, le chef est payé pour penser et ordonner, l'ouvrier pour exécuter. Ce système « historique » a pour qualité une grande stabilité qui était adaptée à la stabilité des environnements économiques et sociaux. Son défaut majeur est de générer un conservatisme incompatible avec des démarches de progrès qui s'appuient sur la qualité des acteurs. Comme on ne peut pas demander à un opérateur *à la fois d'attendre un ordre et de prendre une initiative*, alors privilégions l'initiative.

❑ L'ISO 9000 et l'implication du personnel

Les normes d'assurance de la qualité ISO 9000 et 9004 dégagent explicitement le principe de management par « implication du personnel ». Les promoteurs de la future norme ISO 9000 « version de l'an 2000 » considèrent ce principe comme « donnée d'entrée » pour la nouvelle série. L'article 6, relatif au management des ressources, précise qu'une procédure est exigée pour sensibiliser les employés à l'importance de leur rôle à l'égard du système de management de la qualité et aux avantages d'une performance individuelle accrue. Il est évident que ces dispositions concernent implicitement les hommes de la maintenance, maillons incontournables de la qualité des produits et des services.

❑ Pas de maintenance sans management participatif

L'état d'esprit maintenance est incompatible avec le taylorisme, mais le frein majeur au changement se situe dans la résistance à l'instauration d'un mode de management participatif à tous les niveaux de la pyramide de l'entreprise : il est souvent aussi difficile pour un cadre de déléguer et de faire confiance que pour un technicien de prendre une responsabilité et de s'exprimer.

Le « 0 mépris » indispensable à l'instauration d'un modèle basé sur la délégation et la confiance ne se « décrète » pas : il nécessite un apprentissage de la part de la maîtrise, et cela prend du temps. Pour illustrer (de façon manichéenne) ce nécessaire changement de mode de relations humaines, nous avons mis en parallèle quelques mots-clés opposant le modèle traditionnel au modèle participatif.

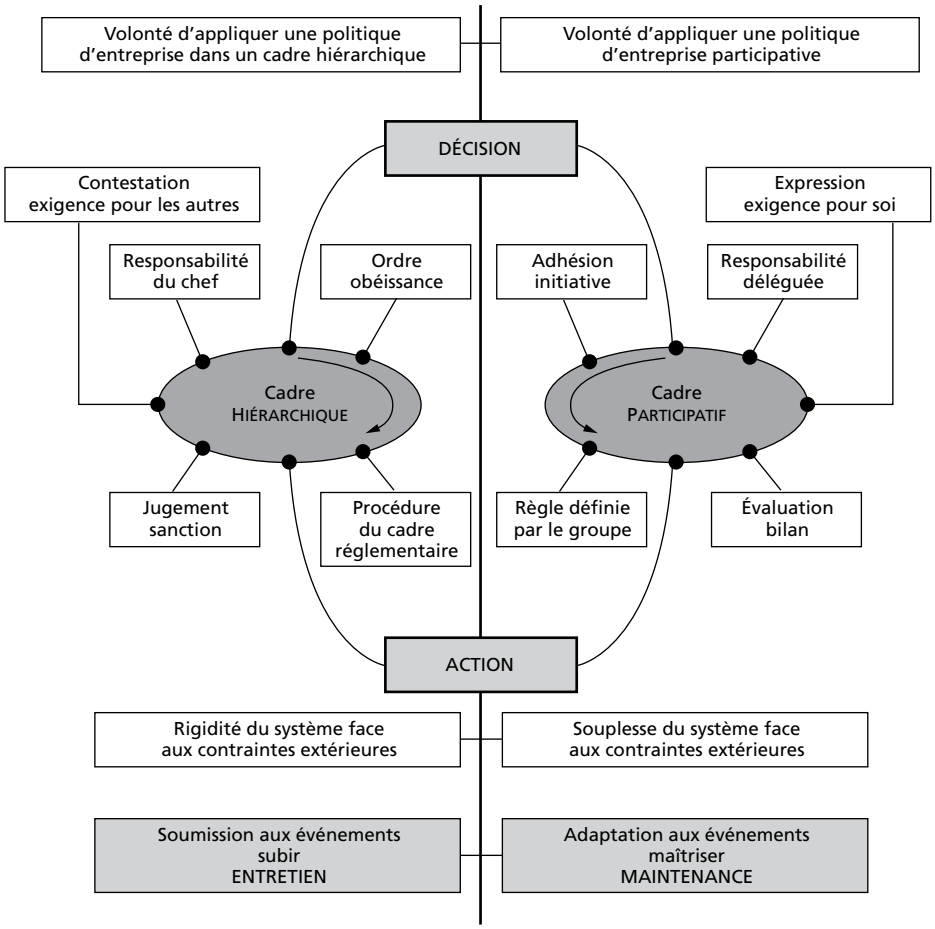


Figure 9.4 – De l'autocratie à la participation

La simplification manichéenne de ce graphe met en évidence un problème incontournable à résoudre : comment passer d'un mode de management à l'autre ? En fait, le changement de mode de management peut se lire suivant le processus étudié

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

par R. Plant dans *Managing Change and Making it Stick* (Harper Collins Publishers, Londres, 1987) et repris dans (LAV 92). Ce modèle est construit à partir de deux axes délimitant quatre zones caractérisant chacune un mode de management, suivant la figure 9.5.

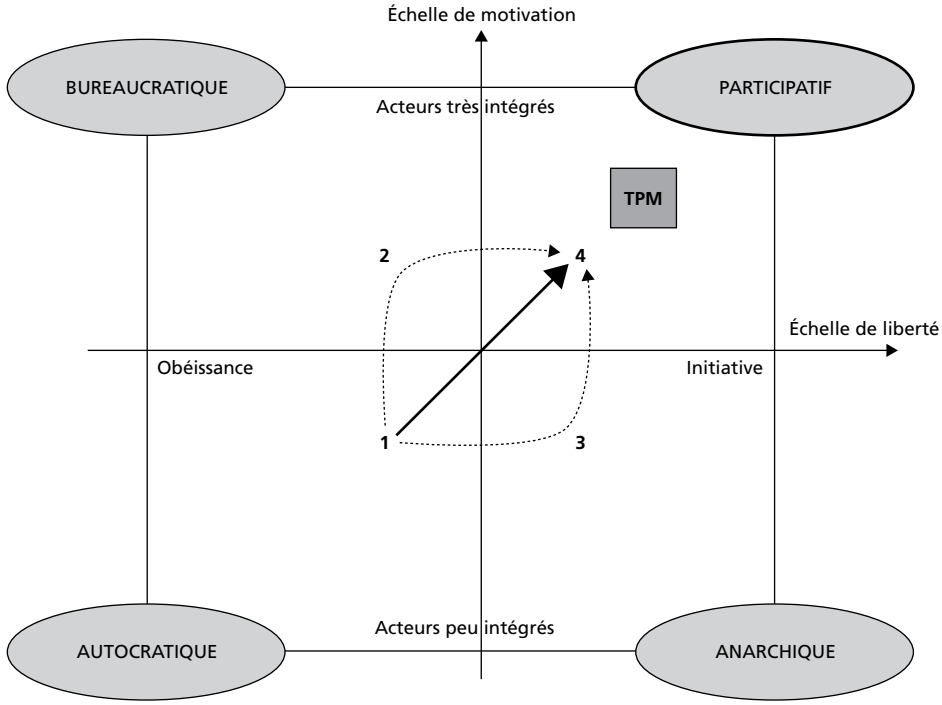


Figure 9.5 – Les différents modes de management

❑ Zone 1

Il s'agit du type de management « historique » résultant de l'époque taylorienne, caractérisé par la concentration du pouvoir par des chefs décideurs, les opérateurs étant réduits à la soumission aux ordres et ne pouvant s'exprimer que par une contestation collective.

Au-delà de la caricature, ce type de management fondé sur le poids de la hiérarchie a pour caractéristique de générer une grande stabilité, mais il est peu compatible avec l'environnement actuel des entreprises, car il est peu réactif.

❑ Zone 4

Ce type de management participatif, ou organique, est caractérisé par l'influence forte des groupes participant à chaque niveau aux décisions. Il y a prédominance de l'intérêt général, un fort niveau de permissivité et donc un fort potentiel de réactivité. Les cercles de qualité illustrent bien ce mode de fonctionnement qui privilégie le consensus, fruit du dialogue et du compromis.

En maintenance, la démarche d'automaintenance s'appuie obligatoirement sur cette délégation de responsabilité. C'est encore plus net en autoqualité où la mise en place du SPC (*statistic process control*) supprime les filtres en aval de la machine « sous contrôle ».

❑ **Zones 2 et 3**

Ces zones caractérisent les dérives possibles de l'évolution nécessaire allant de 1 à 4, suivant la « grande diagonale ».

Zone 2 : si le changement est généré par la multiplication des procédures et des règlements de toutes natures, le mode managérial devient bureaucratique, marqué par la prépondérance des statuts. Il est important de remarquer que la recherche de certification ISO 9000, lorsqu'elle est « forcée », peut s'inscrire dans ce cadre, en opposition fondamentale avec la recherche de la « qualité totale » qui, par nature, n'a de sens qu'en management organique !

Zone 3 : si l'on donne de la liberté d'action, d'initiative et d'expression à des gens peu motivés, mal intégrés dans l'entreprise et non préparés au changement, le jeu devient aventureux et le résultat dépendra de quelques personnalités émergentes.

Nous renvoyons le lecteur au test d'évaluation du type de management présenté dans (LAV 92), test qui permet un diagnostic de la prédisposition à la TPM.

9.2.4 L'amélioration continue par le *kaizen*

Dans ce chapitre consacré à l'apport d'un management participatif pour une meilleure efficacité de la maintenance, il nous paraît indispensable de démystifier ce qui est considéré comme la clé de la compétitivité japonaise, à savoir le *kaizen*. *Kai*, changer, et *zen*, pour le bien : « changer pour le bien ».

Qu'est ce que cette « japonaiserie » et pouvons-nous nous permettre de l'ignorer ? Le mot kaizen signifie « amélioration graduelle continue ». Le kaizen est le changement discret, pas à pas, permanent, qui concerne l'ensemble des acteurs de l'entreprise, du directeur aux techniciens de base.

❑ **Kaizen et le groupe**

Rapporté au groupe, kaizen repose sur la conviction que l'efficacité de l'organisation est liée à une amélioration permanente de la qualité. À ce niveau, on peut parler de philosophie du management intégrant le concept de qualité totale (TQC) ainsi que toutes les techniques de réduction des coûts, des stocks, d'amélioration de la productivité, etc.

Le déploiement de la stratégie kaizen implique une démarche « horizontale », dite « transfonctionnelle » qui, pour ce qui nous concerne en maintenance, demande une redéfinition des tâches « au pied de la machine » entre régleurs, opérateurs, contrôleurs et dépanneurs dans la logique TPM. Cela en rupture avec l'esprit corporatif qui génère des conflits interfonction incompatibles avec la qualité et la productivité requises.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Kaizen et l'individu

Ramené à l'individu, kaizen est une approche humaniste basée sur la conviction que chaque être humain peut apporter sa contribution à l'amélioration de la fonction qu'il remplit. Kaizen représente la propension de chaque salarié à améliorer son outil et sa technique, en rupture avec la routine. Par des activités en petits groupes et par des systèmes de suggestion individuelle ou collective, il est amené à participer à la résolution de problèmes.

❑ Kaizen, moteur du progrès permanent

La recherche d'amélioration n'est donc pas l'apanage de quelques cadres. Mais la mission de ces cadres est de favoriser, reconnaître et récompenser les efforts de leurs salariés, ainsi que l'illustre la figure 9.6.

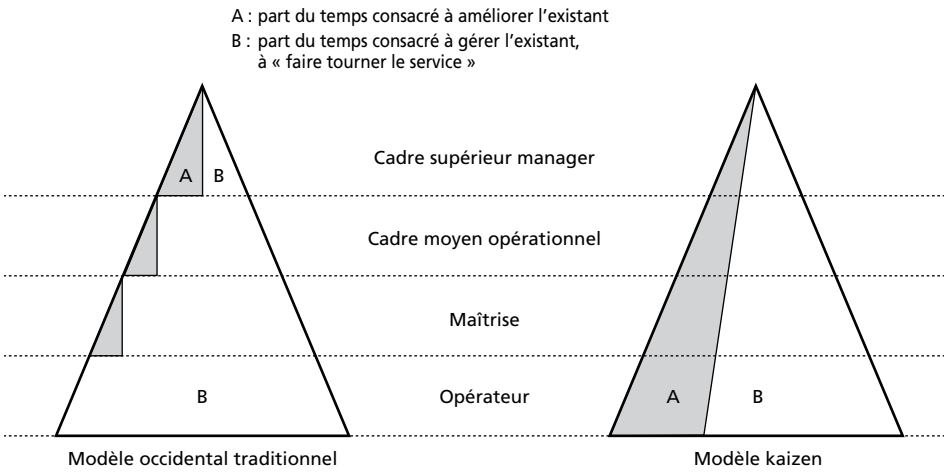


Figure 9.6 – Comparaison des potentiels d'amélioration

❑ Commentaire : le kaizen et/ou l'innovation

Dans nos entreprises occidentales, quels sont les moyens prévus pour qu'un opérateur puisse suggérer une amélioration ? et qu'il y trouve avantage ? Quelle est la valorisation d'un agent de maîtrise qui sollicite et favorise l'expression d'un dépanneur qui voudrait aller plus loin en rompant la routine du dépannage ?

Quelle part de son temps un ingénieur de maintenance consacre-t-il à améliorer l'organisation et les méthodes en place en dehors des « grands projets » auxquels il est associé ? Cela nous amène à opposer deux approches du progrès.

– L'innovation est un changement drastique « par bonds », qui suit des percées technologiques, qui recherche des outils nouveaux (GMAO, par exemple) ou qui applique le nouveau concept à la mode. L'innovation est un moteur caractéristique de l'activité, voire de l'enthousiasme des cadres occidentaux. Ses effets sont, à court terme, discontinus mais spectaculaires, et l'innovation est souvent imposée aux salariés.

– Kaizen, dont les effets, à l'opposé, sont peu visibles mais continus et durables à long terme. L'application du kaizen n'exige pas de gros investissements, mais exige un engagement durable et patient sans doute plus dans l'esprit japonais que dans l'esprit latin ! Une autre caractéristique du kaizen est que l'appréciation sur les performances des acteurs porte plus sur la prise en considération des efforts fournis que sur les résultats, ce qui diffère notablement des habitudes industrielles occidentales. Kaizen se soucie plus du processus que du résultat, puisque c'est l'action positive sur le processus qui entraînera naturellement des résultats meilleurs.

Relever le défi kaizen, c'est sans doute pour les Occidentaux trouver le moyen d'associer *innovation* et *kaizen* au lieu de les opposer. Pour Masaaki Imai, du Kaizen Institute : « kaizen, c'est la philosophie de l'artisan systématisée dans la grande entreprise » (IMA 89). Cette référence à l'artisanat, au « compagnonnage » traditionnel et à son état d'esprit permet peut-être de mieux saisir que l'esprit kaizen est plus proche de nous que nous l'imaginons, à condition de l'intégrer au niveau de l'entreprise en recherchant systématiquement le « zéro mépris ». Est-ce une utopie, ou est-ce réalisable ?

Voilà en tout cas un défi que les entreprises occidentales doivent – graduellement – relever sans perdre pour autant leur riche potentiel d'innovation.

❑ Mise en application d'actions kaizen : exemple français

Quelques entreprises françaises se sont lancées dans cette recherche d'amélioration permanente. La méthodologie repose sur la constitution d'un groupe kaizen lié à la structure de « qualité totale », chargé de réfléchir, puis de promouvoir la culture kaizen dans l'entreprise. La faisabilité repose sur la réalité d'un management participatif dans un climat social stable.

La cible d'amélioration est une opération identifiée comme ayant une valeur ajoutée faible, qu'un coordinateur kaizen et les opérateurs du secteur concernés vont analyser et enrichir. Cette petite équipe va suivre la méthodologie suivante :

– analyse critique de la situation existante par identification et mesure des pertes de temps (manutention, attente, gaspillages, stockages, outillages, ergonomie, etc.) ;
– propositions collectives de solutions, a priori simples, peu coûteuses et faciles à mettre en œuvre ;
– réalisation puis essais avec prise de temps pour validation ;
– présentation par l'équipe aux cadres opérationnels du secteur de la solution retenue par comparaison à la situation antérieure ;
– suivi de l'amélioration « à 30 jours » pour pérenniser (nouvelle procédure, aspects documentaires) la modification.

Il s'agit en fait d'un « minicercle de qualité » à objectif plus modeste et à mise en œuvre plus légère, dont l'efficacité vient de la répétitivité d'actions peu coûteuses qui éliminent progressivement de très nombreuses « pertes » et de l'aspect motivant de la « réflexion-action » pour des opérateurs amenés à s'exprimer dans une situation qu'ils connaissent bien, mais en rupture par rapport à la routine.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

9.2.5 Freins au développement du management participatif

❑ **Forces motrices et forces réactives**

Des forces « motrices » du changement managérial existent à tout niveau dans toute entreprise : elles sont mises en évidence lors de la conduite de tout projet structurant. La recherche de l'assurance qualité est l'une de ces forces motrices : l'ISO 9000 implique explicitement un mode de management participatif.

Des forces « réactives » existent également, ayant pour source l'histoire de l'entreprise, donc la mémoire plus ou moins vive de l'époque « autocratique » et taylorienne. Ces forces passives s'opposent ou freinent toute velléité de changement.

La résultante de ces forces dépend principalement de la conscience qu'ont les salariés de l'existence (ou non) d'une *convergence d'intérêt entre leur situation propre et la situation de l'entreprise*.

Une enquête de 1998 a mis en évidence l'existence d'un scepticisme face à la contradiction entre l'intérêt des entreprises et l'intérêt des acteurs, cela étant vérifié dans tous les pays de l'Union européenne.

❑ **S'agit-il d'un problème de fond ou d'un déficit de communication ?**

Quand la recherche de compétitivité semble se faire au détriment des hommes de l'entreprise, alors la motivation est faible. Les dirigeants d'entreprise ne peuvent pas à la fois considérer les salariés comme une « variable d'ajustement » et leur demander un investissement dans un projet de maintenance productive. Il est indéniable que la menace objective ou subjective sur l'emploi ainsi que la brutalité de certains licenciements s'oppose au respect des salariés qui est le fondement de tout management participatif. Et il est difficile dans ce cas de persuader les gens d'une éventuelle convergence d'intérêt !

S'il ne s'agit que d'un déficit de communication, l'intégration de chaque acteur à la collectivité « entreprise » est un problème soluble dans le temps : le temps nécessaire à la structuration d'équipes progressivement autonomes.

Mais sommes-nous persuadés que la richesse majeure de l'entreprise de demain repose sur la qualité des hommes qui la composent ? Si oui, nous devons collectivement intégrer l'idée que le 0 mépris est à la base du 0 panne aussi bien que du 0 défaut.

9.3 Le rôle de la maintenance dans un projet qualité

9.3.1 Qualité et maintenance : différentes situations possibles

La situation relative de la maintenance et de la qualité est délicate à étudier, car il s'agit de deux fonctions transversales de l'entreprise, largement dépendantes l'une de l'autre : il est évident qu'il ne sera pas possible de fournir des produits ou des services de qualité si l'entreprise ne possède pas la maîtrise de son outil productif. Par boutade, mais avec du bon sens, nous pouvons dire que la qualité de la maintenance permet de maintenir la qualité des produits. Quelles sont les différentes situations possibles ?

– L'entreprise est dans une démarche « qualité totale » (TQC, ou *total quality control*), donc son service maintenance interne est censé mettre en place une démarche d'assurance de la qualité. Nous avons pu mesurer au paragraphe 9.2 le « poids » des ressources humaines en maintenance. Il y aura donc synergie, car la TQC est un puissant vecteur de cohésion interne autour d'une image « qualité » facilement identifiable.
– L'entreprise recherche ou veut pérenniser une certification type ISO 9000 ou EAQF : quelles sont les implications de la certification au niveau de la maintenance ?
– Le service maintenance a pour projet « propre » d'améliorer la qualité de ses services à ses clients internes, dans une relation de type « client-fournisseur ».
– L'entreprise veut introduire des clauses qualité dans un contrat de maintenance le liant à ses sous-traitants.
– L'entreprise est un prestataire de service en maintenance, et ses donneurs d'ordre principaux lui imposent ou lui « suggèrent » une certification.

Nous allons développer particulièrement la deuxième situation, car outre son actualité, elle oblige à dégager un modèle d'assurance qualité en maintenance commun à tous les cas envisagés.

9.3.2 Les normes ISO 9000 et leurs dérivés

❑ Les différents référentiels de qualité ISO intéressant la maintenance

La famille des normes ISO 9000 correspond à un ensemble de référentiels de bonnes pratiques de management en matière de qualité, portés par l'organisme international de standardisation (ISO, International Organisation for Standardization).

Les normes ISO 9000 ont été originalement écrites en 1987, puis révisées en 1994 et à nouveau en 2000.

Ainsi, la norme ISO 9001 version 2000 s'écrit ISO 9001:2000 ; la norme ISO 9001:2000 porte essentiellement sur les processus permettant de réaliser un service ou un produit. Voici une présentation synthétique des différentes normes de la famille ISO 9000 :

ISO 9000 : « Systèmes de management de la qualité - Principes essentiels et vocabulaire ». La norme ISO 9000 décrit les principes d'un système de management de la qualité et en définit la terminologie.

ISO 9001 : « Systèmes de management de la qualité - Exigences ». La norme ISO 9001 décrit les exigences relatives à un système de management de la qualité pour une utilisation soit interne, soit à des fins contractuelles ou de certification. Il s'agit ainsi d'un ensemble d'obligations que l'entreprise doit suivre.

ISO 9004 : « Systèmes de management de la qualité - Lignes directrices pour l'amélioration des performances ». Cette norme, prévue pour un usage en interne et non à des fins contractuelles, porte notamment sur l'amélioration continue des performances.

ISO 10011 : « Lignes directrices pour l'audit des systèmes de management de la qualité et/ou de management environnemental ».

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ **Certification ISO**

L'ISO n'a pas vocation à délivrer elle-même les certifications. Cette tâche est laissée à la charge d'un organisme certificateur tiers, lui-même accrédité par le COFRAC (en France).

La certification ainsi obtenue est valable 3 ans et renouvelable suite à un audit qualité.

En France, la liste des organismes de certification accrédités par le COFRAC pour la certification des systèmes qualité est la suivante :

– AFAQ : Association Française pour l'Assurance de la Qualité ;
– [ASCII QUALITATEM SARL], PME française créée en mars 1994 ;
– Bureau Veritas Certification : L'organisme « BVQI » (Bureau Véritas Quality International) est devenu Bureau Véritas Certification depuis le 20 septembre 2006 ;
– LRQA : Lloyd's Register Quality Assurance ;
– UTAC : Union Technique des Automobiles du motocycle et du Cycle ;
– SGS-ICS SA : Société Générale de Surveillance - International Certification Service ;
– DNV : DNV Certification France = Det Norske Veritas Certification France ;
– AOQC MOODY France ;
– AB CERTIFICATION PME française ;
– DEKRA Certification ;
– BCS Certification PME française, basée à Lyon.

❑ **Le référentiel EAQF**

Il s'agit du référentiel d'évaluation de l'aptitude à la qualité d'un fournisseur élaboré par un groupe de travail réunissant des constructeurs automobiles français et des équipementiers. Il reprend l'ISO 9001 et ses 20 paragraphes, auxquels il ajoute deux paragraphes : § 21 Considérations financières relatives au système qualité et § 22 Sécurité et réglementation relatives au produit. D'autre part, ce référentiel oriente vers les moyens à mettre en œuvre, ce que ne fait pas l'ISO 9000.

D'autres référentiels d'habilitation ou de certification existent, émanant souvent de grands donneurs d'ordres, tels que les Raq 1, 2 et 3 de la DGA (Direction générale de l'armement).

Il convient de remarquer que la démarche de certification est souvent imposée, illustrant la fable du *Loup et l'Agneau*, lorsqu'un « grand » donneur d'ordre exige l'ISO 9000 de tous ses « petits » fournisseurs et sous-traitants.

9.3.3 La certification ISO 9000

❑ **Quelles sont les motivations des entreprises qui recherchent l'ISO 9000 ?**

Quand la démarche est volontaire, elle peut viser à asseoir l'image de qualité du fournisseur vers les clients externes, à se placer en situation de force par rapport à la concurrence sur un marché international, et à générer un projet fédérateur en interne.

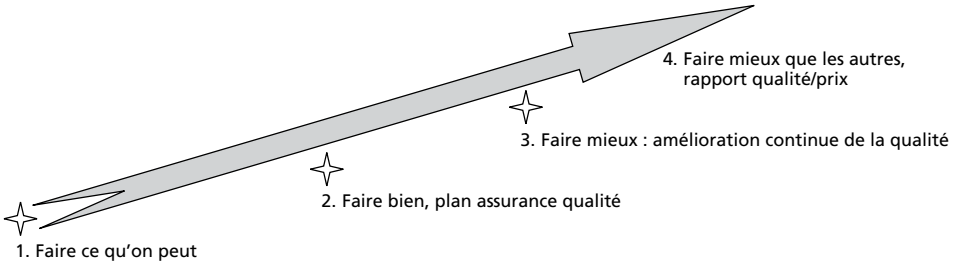


Figure 9.7 – L'ISO 9000 n'est qu'une étape

La certification permet aussi de fidéliser ses donneurs d'ordre dans une relation de confiance. Ce mouvement vers le zéro défaut a fait la preuve de son efficacité aussi bien sur la qualité des produits et des services que sur les mentalités des acteurs. Plus prosaïquement, il peut s'agir d'éviter la prolifération des audits ou d'anticiper une prochaine obligation.

Mais la démarche est souvent imposée par un ou plusieurs donneurs d'ordre, de façon légitime ou parfois abusive. En effet, certaines PME n'ont pas résisté au « surcoût » que représente une certification « forcée ».

Attention

Le projet ISO 9000 ne doit pas interférer avec le développement d'un projet TPM. Bien qu'il n'y ait aucune incompatibilité, la « lisibilité » de chaque projet doit demeurer entière pour les acteurs.

❑ Que signifie « être certifié ISO 9000 » ?

Cela signifie que l'entreprise respecte les exigences édictées par l'une des normes et qu'un organisme certificateur, indépendant et agréé, en France le plus souvent l'AFAQ (Association française pour l'assurance qualité) certifie que les procédures AQ sont bien conçues et suivies. Depuis 1994, le COFRAC (Comité français d'accréditation) a accrédité d'autres organismes certificateurs, comme Véritas, Lloyd's, UTAC, BVQI, ECOPASS ou Ascert International.

Cette certification « par tierce partie » est délivrée après un audit approfondi de l'entreprise, pour un « champ » d'activités précisé et pour une durée limitée pendant laquelle l'entreprise est soumise à une surveillance régulière (audits de suivi et de renouvellement).

Y. Lasfargue, dans un article paru dans *Le Monde* le 29 juin 1994, intitulé « Iso, sado, maso », dénonçait les abus de certains acheteurs et la perversion possible du système qui coûte cher aux entreprises : de 40 000 € à 150 000 € pour une certification, réunions et rédactions détaillées comprises. Cette somme est évidemment à répercuter sur les prix de revient et sur le ratio qualité/prix. Son argument de fond mérite réflexion : la certification repose sur la définition et le contrôle de procédures, puis sur l'hypothèse que « si les procédures sont satisfaisantes et respectées, alors les produits sont bons ». Dans une culture bureaucratique, la dérive est possible : le « parapluie » va se substituer à la recherche d'efficacité opérationnelle, aux dépens de la qualité.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

9.3.4 Implications de la maintenance dans l'ISO 9000

❑ **Du texte de l'ISO 9000 à une démarche AQ maintenance structurée**

Nous allons voir comment il est possible de formaliser les pratiques du service maintenance en accord avec les exigences du référentiel ISO 9000 et à partir de l'organisation et des méthodes existantes.

Si ces dernières sont cohérentes et éprouvées avant la démarche de « certification », l'effort se réduira à une formalisation des procédures nécessaires à l'assurance qualité. Si l'état initial du service maintenance est basé sur une culture « orale » et sur « l'improvisation » des techniciens, la recherche de certification obligera à une remise en cause profonde des habitudes. Dans ce cas, la rédaction des procédures sera l'occasion d'une *réflexion collective sur les missions du service et de chacun de ses acteurs*. N'oublions pas la réflexion relative au système de communication nécessaire à faire vivre le système de formalisation mis en place, souvent insuffisante dans les entreprises.

La norme précise que « le fournisseur doit identifier et planifier les processus de production, d'installation et les processus relatifs aux prestations associées qui ont une incidence directe sur la qualité, et il doit assurer que ces processus sont mis en œuvre dans des conditions maîtrisées ».

Ces conditions de maîtrise des procédés doivent comprendre, entre autres : paragraphe *g*, « la maintenance appropriée de l'équipement de manière à assurer en permanence l'aptitude des processus », ainsi que 7 autres points qu'il n'est pas utile de transcrire ici, l'entreprise visant la certification devant naturellement posséder la norme *in extenso*. Nous pouvons remarquer que les conditions d'implication de la maintenance sont plus souvent implicites qu'elles ne sont explicitées. En fait, notre propos nous amène à guider le lecteur, non pas vers une lecture analytique consistant à prendre chaque paragraphe de la norme et à lui chercher une réponse, mais vers une lecture globale, compatible avec les référentiels, mais de façon transversale.

L'assurance qualité de la maintenance ne doit pas être un frein, austère énoncé de contraintes de nature « administratives », mais un moteur de motivation dans une démarche structurée. *Une bonne occasion, pour beaucoup de services, de préciser ou de repenser leur mode de fonctionnement en s'obligeant… à l'écrire !*

❑ **Les exigences documentaires de l'assurance qualité en maintenance**

Les exigences documentaires de l'ISO 9000 sont fortes, comme est forte par principe l'exigence documentaire de toute assurance qualité, qui consiste à :

– écrire ce que l'on veut faire (phase de préparation),

– faire ce que l'on a écrit (phase de réalisation),

– montrer que l'on a fait ce qui est écrit (phase de contrôle).

Examinons les exigences particulières des normes ISO 9001 et ISO 9002 pour la maintenance.

☐ **Établissement d'un manuel qualité**

« Le fournisseur doit établir un manuel qualité […]. »

Le manuel qualité est établi au niveau de l'entreprise et il montre les engagements de la direction en matière de politique de qualité.

Le manuel qualité est complété par la rédaction de « procédures » générales. Une procédure précise une « manière spécifiée pour accomplir une activité ». Il est donc de la responsabilité du service maintenance d'établir une procédure générale de maintenance.

☐ **Maîtrise des documents et des données**

« Le fournisseur doit établir et tenir à jour des procédures écrites pour maîtriser tous les documents et données relatifs aux exigences de la présente norme internationale. »

Après avoir hiérarchisé les équipements en fonction de leur impact sur la qualité, il appartient à l'équipe de rédacteurs d'établir un plan qualité équipement.

☐ **Maîtrise des enregistrements relatifs à la qualité**

« Les enregistrements relatifs à la qualité doivent être conservés pour démontrer la conformité aux exigences spécifiées et que le système qualité est opérationnel […] tous les enregistrements relatifs à la qualité doivent être lisibles, stockés et conservés de façon à être facilement retrouvés […] dans un environnement approprié pour éviter les détériorations et les pertes […]. »

En maintenance, il s'agira d'organiser une collecte d'informations opérationnelles (rapports d'interventions correctives et préventives, mouvements du magasin, etc.) sur support papier ou informatique, de façon à établir des fichiers historiques assurant la traçabilité des interventions :

– historique des défaillances ;

– historique des actions préventives ;

– historique des travaux et des modifications ;

– historique des mouvements du magasin.

Il faut préciser que la vocation première de la tenue de ces fichiers historiques n'est pas d'être « pour présentation aux auditeurs AFAQ », mais d'être, par leur exploitation, le fondement de la connaissance objective du « terrain » et de la détection des dysfonctionnements aux fins de diagnostic, puis d'amélioration !

9.3.5 Les deux procédures de base de l'AQ maintenance

❑ **Remarques préalables**

L'élaboration de ces procédures, leur identification (cartouche de présentation), leur modification, leur diffusion, leur contrôle et leur archivage doivent être mis en œuvre suivant les préconisations de l'ISO 9000. Pour plus de détails concernant la rédaction des procédures, nous renvoyons le lecteur au guide pratique que Y. Lavina a consacré à l'assurance qualité en maintenance (LAV 98) et auquel nous empruntons la PGM (procédure générale de maintenance) et le PQE (plan qualité équipement), qui forment la « charpente » de l'AQ maintenance.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ **Procédure générale de maintenance (PGM)**

Compatible avec le manuel qualité d'entreprise, la PGM formalise l'organisation du service maintenance, à partir de l'exemple de sommaire suivant.

1. Objet : présentation de la fonction maintenance dans l'entreprise

Ce paragraphe peut comporter l'organigramme fonctionnel du service ainsi qu'un graphe de l'organisation générale.

2. Cadre de la mission du service maintenance

– Nomenclature des équipements, hiérarchisée en fonction de l'impact de leurs défaillances sur la qualité du produit.

– Liste des acteurs du service avec leurs domaines de responsabilité.

3. Modalités d'acquisition et d'approbation d'un équipement

Descriptif de l'implication de la maintenance-travaux neufs à partir du cahier des charges fonctionnel jusqu'au procès-verbal de réception.

4. Descriptif du système documentaire

Liste des documents (catalogues, fichiers, DTE – dossier technique équipement, dossiers) et de leur localisation, procédures de leur mise à disposition, de leur mise à jour et de leur déclassement.

5. Méthodes de maintenance pratiquées

Descriptif de l'organisation du correctif, avant (traitement des DT – demandes de travail, consignes de sécurité), pendant (documents d'aide au diagnostic, gammes), après l'intervention (procédures d'essai), et dans le cas de l'automaintenance :

– descriptif des mesures de surveillance et des consignes permanentes ;

– descriptif de l'organisation du préventif systématique : définition, lancement et exploitation des visites ;

– descriptif de l'organisation du préventif conditionnel : traitement des alarmes.

6. Les PQE (*plans qualité des équipements*)

Exposé des règles d'élaboration, de mise à jour et d'archivage des PQE détaillés ci-après.

7. Organisation des travaux externalisés

– Modalités de choix et d'évaluation des prestataires de service.

– Modalités de négociation de contrats : de l'obligation de moyens vers l'obligation de résultats du « moins-disant » vers le « mieux-disant ».

– Règlement destiné aux entreprises extérieures (plan général de prévention et clauses de sécurité par travaux).

– Conditions générales d'achat.

8. Méthodes d'approvisionnement et de gestion des stocks

– Catalogue et logique de codification des pièces, répertoire des fournisseurs.

– Procédures d'approvisionnement en « achats directs » pour utilisation immédiate, ou pour mise en magasin avec ou sans immobilisation.

– Descriptif de l'organisation du magasin et du contrôle des mouvements.

9. Traçabilité : le suivi des historiques

Il est souhaitable d'établir (définition des paramètres à saisir), de gérer et d'exploiter trois sortes d'historiques par équipement : les défaillances, les actions préventives, y compris les contrôles réglementaires et les « travaux » (modification ou rénovation par exemple).

10. Tableau de bord : indicateurs d'activités et de résultats

Il appartient au service maintenance de déterminer les indicateurs utiles (FMD, activités, coûts, ratios, etc.), d'en déduire les paramètres à saisir correspondants, puis les traitements et supports appropriés.

11. Liste des procédures particulières

Elles peuvent se rapporter, par exemple, à l'exploitation de la GMAO, aux audits internes, au traitement des non-conformités, aux bilans de compétences et aux programmes de formation.

❑ Plans qualité-équipement (PQE)

Pour chaque équipement, le PQE doit formaliser trois composantes : les plans de surveillance, les plans de maintenance et les feuilles d'enregistrement. Ces plans doivent préciser les modes opératoires et les ressources nécessaires à l'obtention de la qualité des interventions. L'ensemble de ces PQE forme le programme de maintenance du service.

1. Le plan de surveillance

Il comprendra les consignes permanentes de sécurité, de conduite, de réglage, de lubrification, d'entretien « 5 S machine », les paramètres à surveiller (valeurs de référence, seuils d'alarme), les mesures conservatoires à prendre en temps réel et les fiches d'automaintenance le cas échéant, etc.

2. Le plan de maintenance

C'est le descriptif de toutes les opérations à réaliser lors d'une ronde, d'une visite ou d'une intervention préventive. Ce descriptif liste l'ordre des opérations et précise les consignes de sécurité puis, pour chaque opération, donne la gamme, les instructions techniques, les fournitures, outillages et pièces nécessaires. Il pourra aussi fournir les éléments d'aide au diagnostic.

3. Les feuilles d'enregistrement

Ce sont les éléments de base de la traçabilité requise par l'AQ maintenance – la « vie » de l'équipement concerné doit être à disposition des techniciens, des agents des méthodes et des auditeurs chargés de la certification.

Au-delà de l'historique des pannes, il est souhaitable de trouver les demandes et les rapports de modification, les rapports de préventif, les analyses et expertises de défaillances, les BSM (bons de sortie magasin).

❑ La traçabilité et l'outil GMAO

L'outil informatique qu'est la GMAO, lorsqu'elle est utilisée de façon optimale, apporte à l'assurance qualité en maintenance ses qualités propres : sa capacité d'enregistrement, sa vitesse d'accès à l'information cherchée, ses potentialités d'exploitation et de visualisation des informations. Il est évident que la recherche de certification

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

implique la rédaction d'un grand nombre de documents qui, mis sous forme « papier », va représenter un ensemble très lourd à gérer. Les actions de maintenance sont très variées par leur nature, leur ampleur, leurs opérateurs et leurs localisations. « Nous réalisons 10 000 interventions correctives en moyenne annuelle… »

Rigueur et mémoire, les qualités de la GMAO satisfont aux exigences de traçabilité de la certification ISO 9000. L'aide informatique s'avère donc utile, voire indispensable aux services ayant le projet de développer leur AQ maintenance.

9.3.6 Les normes environnementales ISO 14000

Le référentiel ISO 14000 obéit à la même démarche que l'ISO 9000, mais il se rapporte à l'assurance de la qualité de l'environnement du site industriel. La protection de l'environnement est une obligation pour l'entreprise qui doit donc l'intégrer à son système de management. La responsabilité de la gestion de l'environnement tombe naturellement dans le domaine des services techniques. Suivant la structure de l'entreprise, elle concerne donc souvent le service maintenance.

❑ Situation du problème : des contraintes environnementales aux gains de productivité

Lavoisier : « Rien ne se crée, rien ne se perd, tout se transforme. » Toute activité industrielle a un impact environnemental, par les énergies perdues et les rejets qu'elle produit.

C'est à partir des bilans énergétiques que peuvent se mettre en évidence les différents impacts plus ou moins agressifs, plus ou moins visibles d'une entreprise sur son environnement. Cette approche par l'énergie montre dès le départ les effets induits que l'ISO 14000 apportera à l'entreprise : pour réduire les rejets, l'entreprise sera conduite à augmenter ses rendements, donc à réduire les gaspillages et ses consommations en interne.

❑ ISO 14000 : un objectif, une référence et une garantie

☐ Un objectif

La protection de l'environnement est une fin en soi. Associée au respect des réglementations en vigueur, à l'image positive donnée aux clients et aux voisins, aux économies que la lutte antigaspillage peut générer, la protection de l'environnement est devenue une politique de premier rang. À ce titre, elle doit intégrer les modèles de gestion itérative mis en œuvre dans l'entreprise : des analyses d'impact, des procédures, des indicateurs de résultats, donc une amélioration permanente.

Le référentiel ISO 14000 fournit l'architecture de ce système de gestion. Les autres objectifs secondaires sont les suivants :

– responsabiliser les intervenants aux gaspillages et aux pertes ;
– abaisser les coûts des primes d'assurance et réduire les recours en responsabilité par des tiers ;
– profiter des marchés favorables aux éco-produits ;
– améliorer l'image de l'entreprise, améliorer les relations avec le voisinage, les clients, la communauté, les organismes de surveillance ;
– améliorer l'intégration du site dans son environnement ;

– profiter des effets sociaux induits en interne : amélioration des conditions de travail, sensibilisation du personnel aux impacts écologiques, diminution des risques, etc. ;
– économiser sur l'achat des ressources naturelles (eau, électricité) et sur les taxes et redevances (par exemple déchets).

☐ **Une référence**

Afin de s'assurer que le système de gestion en place joue son rôle, il est indispensable d'organiser des « éco-audits » par référence à la norme. Voici la définition de l'audit « environnement », d'après la Chambre de commerce international (1989) : « L'audit environnement est un outil de gestion comprenant une évaluation systématique, documentée, périodique et objective du fonctionnement de l'organisation, du système de gestion et de l'équipe destinée à assurer la protection de l'environnement dans le but de faciliter le contrôle, par la direction, des pratiques environnementales et de veiller à la conformité aux politiques de la société, ce qui comprend le respect de la réglementation. »

☐ **Une garantie**

Issue de l'histoire industrielle, la suspicion de pollution a priori pour toute entreprise est manifeste. Un dialogue doit donc s'instaurer pour établir la confiance du « voisinage » (au sens large : riverains, associations de défense, médias, etc.) par un souci de transparence : la présentation de résultats chiffrés ne peut être crédible que par référence à une norme – l'ISO 14000 joue ce rôle.

❑ **Aspects réglementaires de l'environnement**

La réglementation européenne en matière d'environnement doit retenir l'attention des responsables de maintenance par rapport aux points suivants :
– la gestion de l'eau douce et de l'eau potable,
– la gestion et la protection de la mer,
– la gestion des déchets,
– les installations classées et les risques majeurs,
– le contrôle de l'air et de l'atmosphère,
– le contrôle des bruits et nuisances sonores.

❑ **Rôle de la DRIRE (Direction régionale pour l'industrie, la recherche et l'environnement)**

C'est un service régionalisé du ministère de l'Industrie qui a vocation à « concourir à un développement industriel et technologique harmonieux de la région en veillant à la sécurité des personnes et à la protection de l'environnement ». Elle a pour mission d'inspecter les installations classées, délivrant les autorisations d'exploitation au vu de la maîtrise des risques industriels, des rejets d'eau, des émissions de fumées et du traitement des déchets industriels. Elle réalise des diagnostics environnementaux, des audits et des analyses de conformité ainsi que des études de faisabilité en matière de dépollution. À ce titre, elle est un partenaire des services techniques dans leur démarche de maîtrise de l'environnement, même sans recherche de certification.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ **La démarche de certification ISO 14000**

La démarche est identique à celle de l'ISO 9000, un certain nombre d'organismes étant habilités à délivrer la certification. Les plus sollicités sont l'AFAQ, ECOPASS et BVQI France. Rappelons seulement les étapes principales de la certification ISO 14000 :

– la déclaration de la direction d'engager l'entreprise dans un projet ISO 14000;
– la constitution du groupe de projet, qui va déterminer son plan d'action;
– éventuellement, la réalisation d'un benchmarking sectoriel (environnement);
– la demande de certification auprès d'un organisme agréé;
– la réalisation du diagnostic environnemental;
– la rédaction des procédures, avec évaluation documentaire de l'organisme;
– l'audit initial, qui consiste en un examen approfondi du système d'assurance qualité environnemental;
– la certification, valable trois ans;
– le plan de communication, afin de valoriser les investissements « environnement » auprès des clients, des médias et autres partenaires;
– l'audit annuel de confirmation de la certification.

9.3.7 Conclusion : bienfaits et risques de l'AQ maintenance

Le projet assurance qualité est une chance pour l'amélioration de l'efficacité d'un service maintenance interne. C'est un projet fédérateur, car l'objectif est lisible et consensuel. Il implique tous les acteurs dans une réflexion et une remise en cause des modes de fonctionnement préexistants de par l'histoire de l'entreprise. La rédaction de procédure oblige à un effort de rigueur et d'anticipation bien dans l'axe de ce que les « clients » attendent de la maintenance. Ce projet implique une rupture avec la culture « orale » courante chez les hommes de terrain, dépanneurs souvent improvisateurs peu convaincus de l'utilité d'un « papier ».

Toutefois, il faut éviter la dérive possible vers l'excès de formalisation, vers une « bureaucratisation » qui serait peu compatible avec la recherche d'efficacité des hommes amenés à prendre des initiatives, et avec la qualité « opérationnelle » des prestations de la maintenance. La « qualité de conformité » ne doit pas s'opposer à la « qualité de compétitivité », elle doit la favoriser.

9.4 La maîtrise économique du cycle de vie des équipements

9.4.1 Terminologies comptables, AFNOR et CEN utiles

❑ **Notions comptables**

Le plan comptable français impose une comptabilité générale aux entreprises. Mais chaque entreprise peut mettre en place une comptabilité analytique adaptée à la structure de l'entreprise afin de faciliter la gestion. Remarquons l'intérêt d'utiliser une GMAO compatible avec la comptabilité analytique de l'entreprise… si la comptabilité économique est logique avec le découpage des équipements !

Les « immobilisations » sont des biens enregistrés en comptabilité, destinés à rester sous une forme constante dans le parc matériel. Les équipements sont donc des immobilisations corporelles et « amortissables », puisque de nature à perdre de la valeur dans le temps.

❑ **Définitions utiles (CEN)**

Durabilité : « aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données d'usage et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint ».

Un état limite d'un bien est caractérisé par sa fin de vie utile, ou par son inadaptation à l'usage pour des raisons techniques ou économiques.

Vie utile : « C'est l'intervalle de temps […] qui se termine quand le taux de défaillance devient inacceptable ou quand le bien est considéré comme irréparable à la suite d'une panne ou pour d'autres raisons pertinentes. »

Remarque

Nous donnerons à la durabilité un sens prévisionnel (espérance de vie utile) et à la vie utile un sens opérationnel (mesure de λ).

❑ **Définitions utiles (AFNOR)**

Coût global de référence : « Ensemble des dépenses induites pour l'utilisateur par l'acquisition d'un bien, pour un usage de référence et une durabilité donnée ».

Remarque

Le coût global de référence (CGR) représente une estimation du coût de possession d'un équipement, en quasi-synonymie avec le concept anglo-saxon de *LCC* : *life cycle cost*. Nous adopterons l'abréviation *LCC,* plus usitée.

Coût moyen par unité d'usage : « Rapport entre le coût global de référence et la durabilité estimée en nombre d'unités d'usage ».

Remarque

Un sens prévisionnel est donné par l'AFNOR au C_{mu}. Nous nommerons C_{ma} le coût moyen annuel, de forme identique, obtenu par bilans annuels successifs.

9.4.2 Situation du problème

Le service maintenance a la charge de la santé de chaque équipement tout au long de son cycle de vie utile, de la « recette » jusqu'à la période de vieillesse et au déclassement. Il a également la responsabilité de la maîtrise des dépenses afférentes à la possession de chaque « immobilisation corporelle » (bien durable enregistré en comptabilité générale).

En fait c'est en amont, par les « travaux neufs » que débutent la prise de responsabilité de la maintenance et les dépenses de possession induites, hors *VA* (coût d'acquisition). Le service « ingénierie-travaux neufs », en liaison avec la maintenance et la production, doit participer :

– à l'élaboration du cahier des charges (clauses de disponibilité, en particulier) ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– au choix du matériel et du fournisseur ;
– à la définition des éléments du soutien logistique ;
– à l'intégration de ce matériel dans l'infrastructure existante.

Vont se poser au gestionnaire de maintenance les questions successives suivantes.

1. Quelle est la durabilité prévisionnelle de l'équipement ? Il pourra en déduire le plan d'amortissement, mais également des éléments de stratégie de maintenance relatifs au niveau de soins préventifs à apporter à l'équipement. Cette vision à long terme s'oppose par nature aux exigences de productivité à court terme qui intéressent tout naturellement la hiérarchie « productive ».
2. À quel moment ce matériel fournit un gain d'exploitation maximal ?
3. À quel moment doit-on cesser les actions de maintenance ? Est-on obligé de faire de « l'acharnement thérapeutique » sur ce matériel ?
4. À quel moment faut-il le déclasser ?
5. A-t-il une valeur de revente ? Ou au contraire que va coûter son rebut, ou son démantèlement ?
6. Faut-il le remplacer à l'identique ? Ou par un matériel de nouvelle génération ?
7. Faut-il le rénover ? Ou le reconstruire ?

Ces questions incontournables doivent être abordées avec des outils économiques permettant de rassembler des données objectives qui seront nécessaires, mais pas suffisantes à la bonne décision.

En effet, les réponses pertinentes à ces questions prendront en compte une vision à moyen ou long terme de la politique de l'entreprise, de l'évaluation du marché auquel se rapporte l'équipement, des outils utilisés par la concurrence, de l'évolution technologique des équipements (plus ou moins de flexibilité) et des possibilités financières d'investissement de l'entreprise au moment de la décision.

9.4.3 La durabilité : analyse prévisionnelle de la vie d'un matériel

La figure 9.8 nous permet de distinguer trois périodes « commerciales » :
– la période de garantie (T_o, T_g),
– la période hors garantie (T_g, T_z),
– la période de commercialisation (T_a, T_b),

et deux périodes de maintenance, dites à durabilité économique (T_o, T_x), puis à durabilité consentie (T_x, T_z).

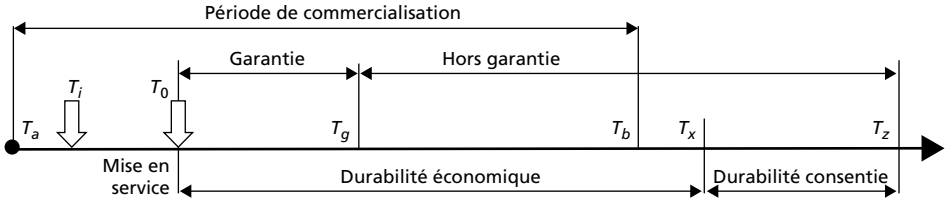


Figure 9.8 – Le cycle de vie d'un équipement

T_i est la date de décision initiale de réaliser l'investissement d'un équipement.

(T_i, T_o) est la période d'études préliminaires à l'intégration et au démarrage, par les « travaux neufs ».

T_o est la date de début d'exploitation après installation, recette et essais contradictoires.

T_x est le terme de la période optimale économique d'utilisation du matériel. Elle atteint couramment 15 ans pour des machines de production. C'est par analogie avec des matériels connus et équivalents que T_x est fixé a priori. Ce seuil est atteint lorsque le cumul des coûts de défaillance n'excède pas x % de V_a = valeur d'acquisition actualisée : nous parlerons alors de durée de « vie utile ».

T_z est la date de décision de déclassement du matériel, pour revente, rebut ou reconstruction.

La durabilité consentie (T_x, T_z) peut être intéressante s'il est possible de maintenir un niveau de performance admissible associé à la réduction des coûts de maintenance en fin de vie du matériel amorti.

Attention aux difficultés d'approvisionnement des pièces détachées après T_b, date de fin de commercialisation du matériel.

9.4.4 Le *LCC* (coût du cycle de vie) et ses exploitations multiples

❑ Définition du *LCC*

Le coût du cycle de vie d'un équipement (ou coût global de référence) est « le cumul par années successives, de toutes les dépenses relatives à la possession d'un équipement » jusqu'à son démantèlement. Il est parfois possible d'y associer les recettes qu'il procure, quand elles sont chiffrables. Elles sont facilement chiffrables lorsqu'il s'agit d'un parc matériel dont chaque élément génère des recettes identifiables, telle qu'une flotte d'autocars par exemple.

Remarque

Le cumul des coûts sur des périodes longues (souvent 15 à 20 ans pour du matériel de production) implique une actualisation des valeurs pour que le cumul en francs constants soit significatif.

1 franc 1980 + 1 franc 2000 = ?

❑ Illustration graphique

Quel que soit l'équipement, les courbes « lissées » représentatives du *LCC* ont toujours l'allure de la courbe de la figure 9.9 ci-contre.

0 est la date de décision de l'investissement.

(0, t_0) est la période d'études préliminaires à la mise en service t_0, V_A étant le cumul des coûts liés à l'investissement.

(t_0, t_1) est une période d'exploitation déficitaire, ainsi qu'au-delà de t_3 où les coûts de maintenance vont croître inexorablement.

(t_1, t_3) est la zone d'exploitation rentable. t_2 représente la période d'optimisation économique de l'exploitation.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

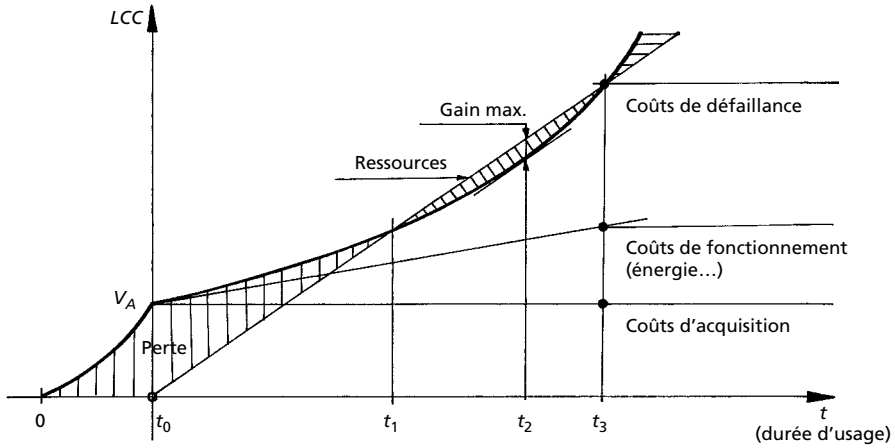


Figure 9.9 – Courbe du coût du cycle de vie d'un équipement

☐ Variante possible de la représentation du *LCC*

Elle se construit à partir d'axes différenciés pour les recettes et les dépenses, selon la figure 9.10. Cette forme moins classique est équivalente et de meilleure lisibilité.

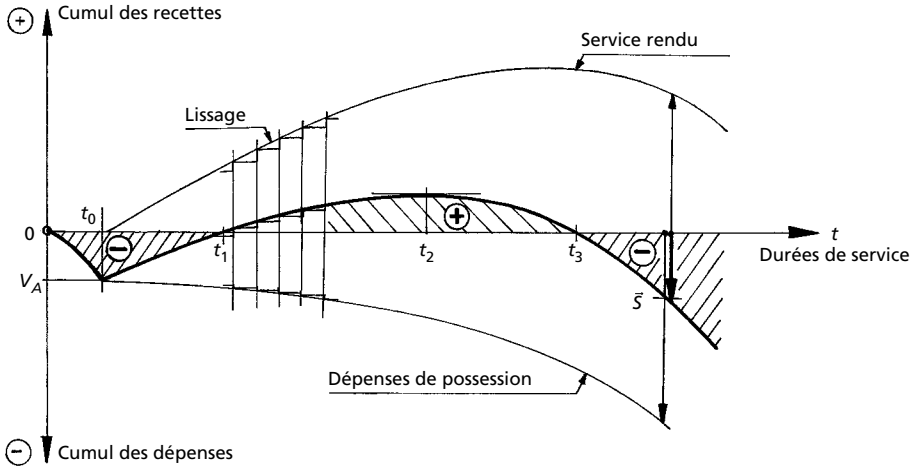


Figure 9.10 – Variante du *LCC*

❑ Constitution du *LCC*

$$LCC = V_A + D_F + C_D$$

V_A représente l'investissement initial, constitué des frais d'études préliminaires (rédaction du cahier des charges, choix du fournisseur, passation de commande,

intégration de l'équipement à l'existant), des frais relatifs à la logistique associée, du coût de l'équipement et de sa recette. Ce coût sera supposé réalisé à la mise en service, et sera évalué en francs ou en euros constants. Mais il est également possible de représenter l'échelonnement des versements, dans le cas d'un emprunt par exemple.

Il est possible de corriger V_A en fin de vie d'un équipement en lui ajoutant le coût du démantèlement ou en lui retranchant, quand le cas se présente, sa valeur de revente.

D_F représente les dépenses de fonctionnement, telles que les énergies et les consommables. Elles sont le plus souvent fixes par unité de temps. Bien évidemment, les coûts de main-d'œuvre liés à l'exploitation normale du matériel doivent être inclus : se souvenir des négociations autour de la présence ou de l'absence d'officiers mécaniciens navigants sur les avions de ligne ! La représentation des D_F sera linéaire, donc proportionnelle au temps d'utilisation.

C_D représente le cumul des coûts de maintenance augmentés des coûts indirects lorsque l'on peut les estimer. Ces coûts sont naturellement croissants, liés à l'usure et au vieillissement de l'équipement.

Les recettes, lorsque l'on peut les estimer (facturation du service rendu par exemple), sont supposées constantes par unité de temps.

Le ratio $r = LCC/V_A$ est un indicateur de criticité économique du soin à apporter à la gestion du matériel :

– si $r = 1{,}3$ sur 15 ans, inutile de faire une maintenance « pointue »;

– si $r = 20$, mieux vaut optimiser la prise en charge par la maintenance et mieux préparer l'investissement la prochaine fois !

❑ Interprétations du *LCC*

Visualisant par bilans annuels successifs toutes les données économiques liées à la possession d'un équipement, le coût global est très riche d'interprétations, en particulier par le ratio LCC/V_A. Il figure naturellement dans un tableau de bord, comme outil d'aide à la décision de remplacement.

Il est important de noter que la connaissance de cette courbe n'est connue complètement qu'a posteriori, c'est-à-dire à l'issue du déclassement. Mais le caractère similaire de toutes ces courbes, au ratio LCC/V_A près, permet de réfléchir a priori aux implications de l'outil *LCC* que nous allons développer ci-dessous.

❑ Le *LCC*, outil de détermination de la période de remplacement

La figure 9.11 explique comment il est possible de localiser la période de diminution de la rentabilité d'exploitation, période où la question du remplacement de l'équipement doit être posée, sans connaître nécessairement les recettes. Il suffit de porter par cumul annuel les dépenses de maintenance. Nous constatons que l'angle α décroît, puis se stabilise dans la zone du point M, puis il augmentera si l'exploitation se poursuit.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

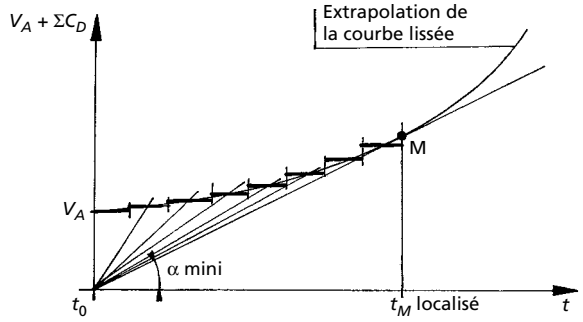


Figure 9.11 – Détermination de la période de remplacement

La figure 9.12 permet de résoudre le même problème en tenant compte d'une éventuelle valeur de revente R_V (valeur qui décroît avec le temps d'usage), ce qui conduit à envisager le remplacement plus tôt.

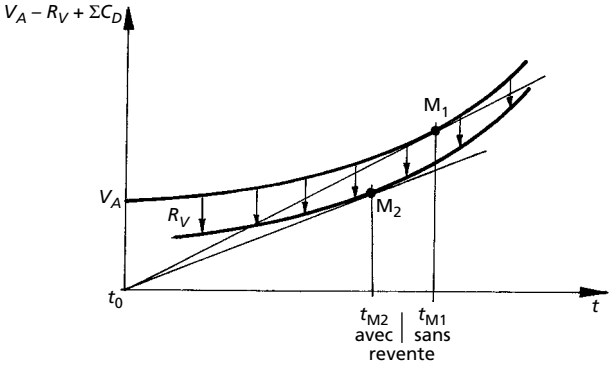


Figure 9.12 – Cas d'une valeur de revente

❑ Le *LCC*, argument de choix d'investissement

On considère généralement que 90 % des coûts de fonctionnement et de maintenance générés par l'exploitation d'un équipement sont prédéterminés lors de la mise en service. En effet, il suffit de faire une « expertise » de défaillance pour trouver des causes intrinsèques au niveau de la conception, de la fabrication ou du montage, voire du transport de l'équipement. Quant aux causes extrinsèques venant de l'environnement du système, ce sont le plus souvent des facteurs identifiables (car l'utilisateur connaît l'environnement du système !), mais qui n'ont pas été pris en compte lors des phases initiales. Autrement dit, la potentialité de défaillance est déjà dans le système neuf mis en service. L'exploitation révélera ces événements, mineurs ou majeurs, au fur et à mesure de l'usage.

Les techniciens doivent savoir qu'acheter une machine, c'est évidemment acheter un service attendu, mais c'est aussi engager tous les coûts potentiels dus aux inévitables arrêts de ce service. La courbe *LCC* (figure 9.13) illustre cette évidence mal connue, ou du moins souvent négligée.

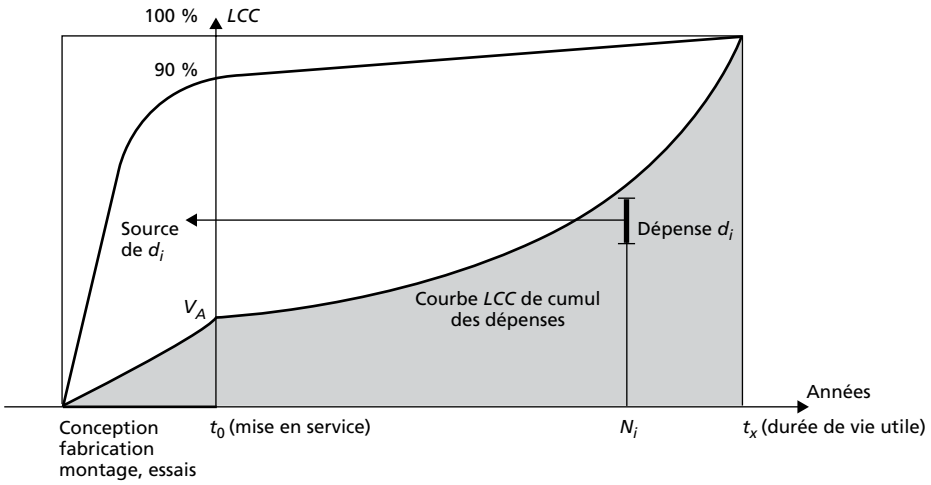


Figure 9.13 – « Poids » de la conception-fabrication sur le *LCC* d'un équipement

Interprétation : *environ 90 % des dépenses engagées pendant la durée de vie d'un équipement sont prédéterminées avant la mise en service*. Ainsi, l'expertise relative à une défaillance entraînant une dépense d_i la *n*-ième année montrera l'existence de niveaux de causes intrinsèques liées à la conception, à la santé-matière, au mauvais choix de composants ou au montage, etc. Il en est de même pour les dépenses de fonctionnement.

Aussi faut-il en déduire la manière de réaliser un investissement productif : utiliser les compétences des techniciens et ne pas laisser un « commercial » négocier seul pour obtenir 5 % de rabais déterminant le choix d'un investissement lourd. Un problème identique se pose lorsqu'une entreprise publique doit se soumettre au code des marchés publics reposant sur la règle du choix du fournisseur « moins-disant » ! L'idée force mise en évidence par le *LCC* étant que *la logique du mieux-disant doit se substituer à la logique du moins-disant*, dans une réflexion à moyen et à long terme.

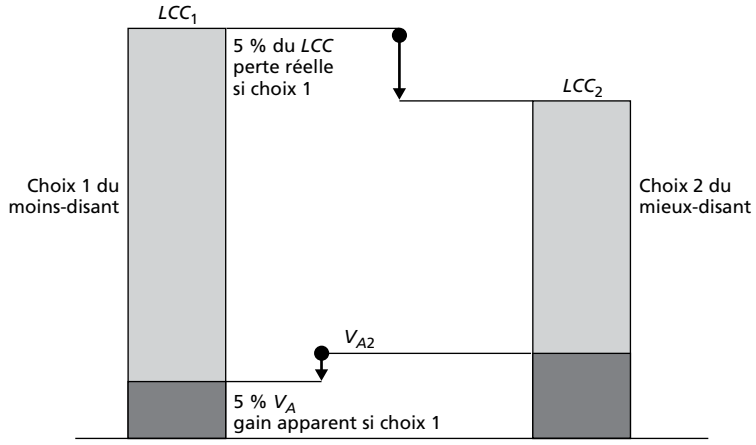


Figure 9.14 – Investir pour le long terme

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

La logique du moins-disant s'avère évidemment calamiteuse si le *LCC*, qui va se révéler sur les 15 années suivantes, s'avère, suivant l'exemple de la figure 9.14, 5 % supérieur au produit concurrent non choisi. Car il ne faut pas comparer 5 % de V_A avec 5 % du *LCC* lorsque le *LCC* est égal à 10 V_A !

Pour conclure, en phase d'investissement d'un équipement productif, il est important que la notion de « coût du service rendu » se substitue au « coût d'acquisition » de l'équipement, cela d'autant plus que la flexibilité mise dans l'équipement augmente sa durabilité, donc la valeur du ratio LCC/V_A.

La démarche dite « PCMI » (prise en compte des contraintes de maintenance lors des investissements) a pour objet d'obtenir la maîtrise des coûts de maintenance à leur origine.

Penser coût global de possession, c'est mieux construire et mieux investir aujourd'hui pour moins dépenser demain.

9.4.5 Le C_{ma} (coût moyen annuel de maintenance) et ses utilisations

❑ Constitution des C_{ma}

À tout instant, un équipement possède :

– une valeur d'investissement, notée V_A (étude + achat + installation) ;

– un cumul de ses coûts de défaillance ΣC_D ;

– une éventuelle valeur de revente, notée R_V (offre et demande).

Le coût moyen annuel, la n-ième année, est donné par :

$$C_{ma}(n) = \frac{V_A + \sum_{1}^{n} C_D - R_V}{n}$$

Si une rénovation est faite sur le matériel, l'expression devient :

$$C_{ma}(n) = \frac{\text{P achat} + \text{Entretien cumulé} + \text{C rénovation} - \text{Revente}}{n}$$

❑ Actualisation des coûts

Si i est le taux d'intérêt de l'argent (indice INSEE à la consommation), alors la formule du coût moyen annuel devient :

$$C_{ma(n)} = \frac{V_A(1+i)^n - R_V + \sum_{x=1}^{n} C_{D(x)}(1+i)^{n-x}}{n}$$

❑ Allure de la courbe

La courbe $C_{ma} = f(t)$ est toujours une courbe en baignoire (figure 9.15) qui passe par un minimum marquant la « durée de vie économique ».

Outre la détermination de la durée de vie économique, le C_{ma} est un indicateur économique qui peut être ramené à l'heure d'utilisation, soit C_{mh} : il permet donc

de savoir combien nous coûte la possession de l'équipement E_i chaque heure, en moyenne annuelle. Par analogie, le *PRK* (prix de revient kilométrique) d'une voiture est un indicateur de même nature.

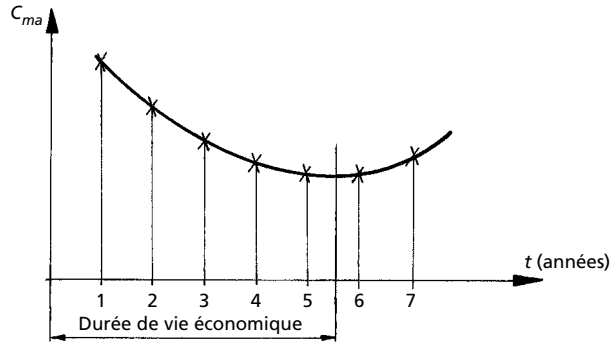


Figure 9.15 – Courbe $C_{ma} = f(t)$

❑ Application du C_{ma} à la détermination du « budget annuel admissible »

Comparons chaque année, pour un équipement donné, la somme des coûts de défaillance enregistrée dans l'année avec le C_{ma}. Lorsque ces deux valeurs deviennent égales, il est possible de prolonger l'exploitation de l'équipement à condition de maîtriser les dépenses directes et indirectes telles que C_d soit inférieur à C_{ma} : cela nous donne le budget annuel admissible de l'équipement.

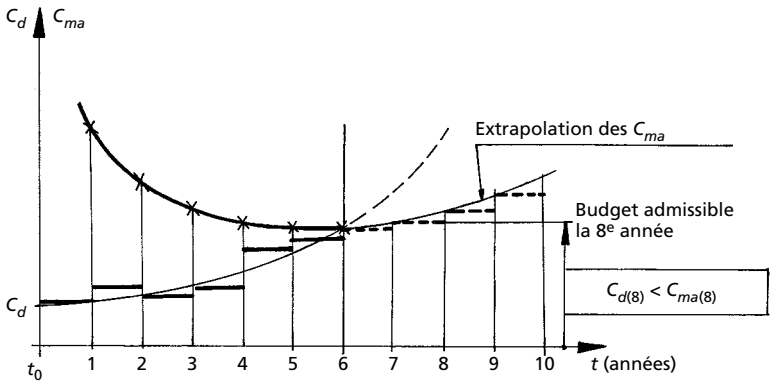


Figure 9.16 – Budget annuel admissible

❑ Application du C_{ma} à la politique de renouvellement d'un matériel

Soit un équipement mis en service à t_0. Nous allons envisager, à l'issue de la sixième année, trois hypothèses de choix :

1. nous prolongeons la vie de cet équipement;
2. nous le rénovons;
3. nous le remplaçons à l'identique.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

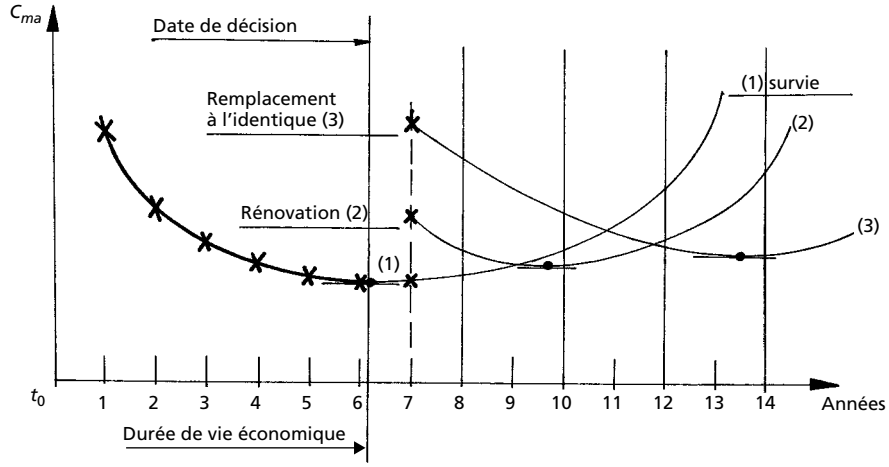


Figure 9.17 – Renouvellement d'un équipement

– Option 1 : nous prolongeons l'utilisation de la machine. À court terme (années 7 et 8), c'est la solution économique. À long terme, au-delà de l'année 11, c'est la plus onéreuse.
– Option 2 : une rénovation permet de limiter l'investissement, ce qui, à l'horizon 10 ans, est le plus intéressant. Par contre, la dépréciation est importante (R_V faible ou nulle).
– Option 3 : remplacement à l'identique par une machine neuve. L'investissement est important, mais c'est la meilleure solution à partir de la douzième année.

Pour conclure, rappelons que la détermination d'une politique de renouvellement de matériel est un problème complexe ne reposant pas uniquement sur des critères économiques, mais faisant appel à de multiples critères de décision liés à une vision à long terme de l'entreprise et de son environnement. Notre ambition est simplement de décrire des modèles objectifs d'aide à cette réflexion prospective.

10 • ÉVOLUTION DE LA MAINTENANCE : LES NOUVELLES ORGANISATIONS

10.1 Manager le changement d'organisation

10.1.1 Un mot clé de la maintenance : « l'organisation »

« Les systèmes ne sont pas dans la nature, mais dans l'esprit des hommes » (Claude Bernard en 1855). Définitions de l'organisation :

– Larousse : « l'organisation est la manière dont les parties qui composent un être vivant sont disposées pour remplir certaines fonctions » ;
– Larousse : « l'organisation scientifique du travail (OST) est l'ensemble des activités coordonnées qui ont pour objet d'établir la meilleure répartition des tâches et de meilleures conditions de travail ».

Cette technique combinatoire se réalise à partir de la vocation d'un ensemble (l'entreprise) par combinaison heureuse des parties (les fonctions à assurer).

❑ L'organisation et ses enjeux

Afin de mieux situer les enjeux liés aux réorganisations industrielles en général, et aux nouvelles organisations de la maintenance en particulier, il est nécessaire de brosser un rappel de l'histoire de l'organisation industrielle récente.

□ De l'approche systémique à la révolution électronique des « nouvelles technologies »

Jusque dans les années 1970, l'organisation était au cœur de la formation des ingénieurs. Principalement sous forme d'analyses de postes de travail et d'optimisation de temps technico-humains.

À cette date « l'école systémique » propose une théorie dérivée de la cybernétique (Wiener) étudiant toutes les interactions des différents facteurs de production. En 1961, J. W. Forester écrit la *Dynamique des systèmes industriels*. La systémique, en tant que moyen d'étude de la « complexité organisée », a servi de support conceptuel au fabuleux développement électronique-informatique, qui mit au premier plan l'innovation technologique des produits, mais surtout des procédés. Ce fut une période où la « course à l'armement », à l'investissement productif était considérée

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

comme le critère majeur de la compétitivité, l'organisation étant reléguée au second plan. Les ingénieurs de production étaient alors focalisés sur les seules contraintes techniques, oubliant de ce fait l'ensemble des conséquences psychologiques et sociales entraînées par l'organisation de nouveaux postes de travail.

□ **Émergence d'un besoin d'organisation « sociotechnique » flexible**

Les investissements en systèmes automatisés une fois réalisés (les mêmes outils étant utilisés simultanément par la concurrence dans tous les pays industrialisés du monde), c'est *l'organisation mise autour des systèmes qui redevient un critère stratégique de la compétitivité.* Les transferts technologiques vers des pays en voie de développement ont souvent montré « par défaut » que faute de logistique et de compétence humaine, un système de production intrinsèquement performant peut produire mal, ou trop peu, ou rien !

Toutes les organisations actuelles sont centrées sur la recherche de la « qualité totale ». L'expérience japonaise les a validées dans les années 1980. Elles découlent toutes de *l'approche sociotechnique.* C'est-à-dire sur une organisation conciliant de façon équilibrée la satisfaction des contraintes techniques (le système technique) et la satisfaction des besoins psychologiques et sociaux des salariés (le système social). S'appuyant inévitablement sur un modèle participatif de gestion, elles remettent l'homme au cœur de l'activité industrielle, comme principale richesse de l'entreprise et comme principal facteur de compétitivité.

Mais la flexibilité requise pour ces nouvelles organisations n'est pas simple à mettre en œuvre. Car, si remplacer un équipement technique par un autre plus évolué est relativement aisé, faire évoluer en parallèle les organisations, les compétences et les mentalités est moins rapide, moins facile et tout aussi indispensable.

Pour synthétiser les idées émergentes de ce rapide historique de l'évolution des organisations, disons que :

– il n'existe aucun modèle absolu d'organisation, mais des modèles qui se révèlent plus ou moins efficaces dans leur confrontation aux situations réelles ;
– une bonne organisation intègre entièrement la dimension humaine en plus de la satisfaction des contraintes techniques ;
– une bonne organisation aujourd'hui ne le sera plus demain : toute organisation est inexorablement appelée à évoluer.

10.1.2 Conduire le changement

❑ **Pourquoi, à partir d'une situation existante, doit-on faire évoluer une organisation ?**

Dans l'environnement concurrentiel et mondialisé actuel, la « veille organisationnelle », la remise en cause des méthodes de travail et la recherche d'amélioration permanente sont vitales pour les entreprises. Ces changements étant orientés sur une cible bien identifiée : la satisfaction des besoins du « client », client de plus en plus exigeant, concurrence oblige.

L'essor japonais, dans les domaines électroniques et automobiles principalement, a secoué les État-Unis et l'Europe en les obligeant à une remise en cause de leurs

concepts et de leurs organisations. La réponse au « pourquoi » est donc simple, puisque sans alternative : les méthodes anciennes sont inadaptées à la mouvance économique, technologique et concurrentielle. Leur extrapolation conduit dans le mur. Il faut donc en expérimenter d'autres. La maintenance appartient à ce champ expérimental, à travers deux étapes successives de réorganisation :

1. le passage de l'entretien traditionnel à une maintenance structurée autour d'une fonction « méthodes » forte, avec pour enjeu de quitter le « cercle vicieux de l'entretien » ;
2. le développement de la maintenance productive dont la ligne directrice est le décloisonnement des fonctions techniques appelées à collaborer de façon « transverse » dans la cohérence d'une recherche d'efficacité de l'ensemble. La TPM est caractéristique de cette approche globalisée, étudiée au paragraphe 10.2.

❑ **Comment, à partir d'une situation présente, peut-on faire évoluer une organisation ?**

Il est nécessaire de créer une « situation de rupture », déclenchée par des forces extérieures : l'environnement concurrentiel et la satisfaction du client. Les deux pieds au sol, l'homme est stable, mais immobile ! Le seul moyen d'avancer est d'avancer un pied, donc de rompre cet équilibre (confortable) en maîtrisant au mieux le déséquilibre provoqué. Il en est de même pour une entreprise et pour chacune de ses fonctions.

Le choix réside en fait entre l'évolution, s'appuyant sur une situation préexistante, ou la révolution remettant en cause l'architecture générale de l'entreprise, les fonctions et les processus : nous parlerons dans ce cas de *reengineering*, ou de reconfiguration de l'entreprise (§ 10.1.4).

☐ **Faire évoluer une organisation** (figure 10.1)

Autour d'une ligne de production automatisée et à partir des concepts actuels de la productique (le juste-à-temps), mais aussi à partir du « terrain », des moyens matériels et des ressources humaines présentes, il reste à imaginer puis à expérimenter les organisations les mieux adaptées, sachant qu'il n'existe nulle part de modèle organisationnel absolu ni prédéterminé.

☐ **Moteurs du changement**

Nous avons vu que les moteurs principaux sont extérieurs à l'entreprise :

– la satisfaction des clients, en terme de rapport qualité prix sur un marché donné ;

– l'environnement concurrentiel, sur ce même marché.

Des forces internes existent aussi, dès lors que l'on peut obtenir l'adhésion des salariés en faisant en sorte que les nouvelles technologies constituent pour eux une opportunité de développement et d'amélioration de leurs conditions de travail, et non une dépossession de leur savoir-faire. La très grande majorité des salariés peut évoluer grâce à la formation continue et à une organisation adaptée à leurs compétences.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

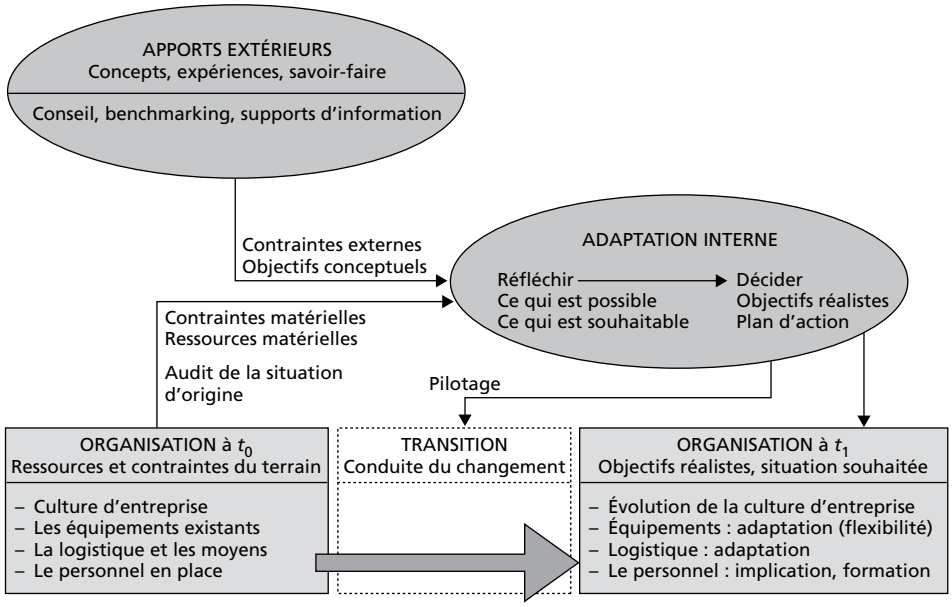


Figure 10.1 – Faire évoluer une organisation

Un autre aspect « moteur » fréquent est lié à la prise de conscience collective que la survie de l'entreprise dans son champ concurrentiel est garante du maintien de l'emploi. Et que le statu quo est suicidaire.

Une crise = un danger + une opportunité

Dire de la crise qu'elle est un danger est un truisme. Montrer qu'elle est une opportunité forte de remise en cause des habitudes individuelles et collectives est plus positif.

Sur le plan individuel, une pédagogie du type « formation-action » intégrée permet de vivre la double rupture technologique et organisationnelle sous la forme de la continuité, et de vivre le changement sous la forme d'un « perfectionnement ».

Sur le plan collectif, la crise est l'occasion de dépasser les résistances habituelles au changement dans une synergie orientée vers l'objectif consensuel *faire vivre l'entreprise, donc maintenir les emplois*. Et pour ce faire, rejeter le statu quo, donc accepter le changement.

□ Stratégie de la conduite du changement

Tout commence par un audit chargé de caractériser la situation initiale. Afin de réaliser cet état des lieux, notons l'intérêt des techniques spécifiques d'audit de la maintenance proposées par Y. Lavina (LAV 92).

Entre la situation initiale et la situation souhaitée, il faut considérer la situation transitoire comme un processus qu'il va falloir piloter. En sachant que bien des changements se transforment en échec par manque de préparation, par sous-estimation des résistances et par minimisation des conséquences sociales. La situation

transitoire va modifier la répartition et la nature des responsabilités, va proposer de nouveaux modèles de communication et de relations et va simplifier ou supprimer certains contrôles. Elle va donc générer :

– une déstabilisation créant une forte tension émotionnelle (doute, inquiétudes) ;
– une surdépense d'énergie mal canalisée pendant la phase de transition ;
– une surévaluation de la situation antérieure, apparaissant plus « confortable » ;
– une augmentation de la résistance et du risque de conflit.

La conduite du changement doit être menée par un groupe de pilotage interne aidé par un consultant (l'œil extérieur quasi indispensable). Ce groupe doit intégrer les difficultés précédentes pour les dépasser, sachant que « pendant les travaux, la vente continue ! ». Il convient donc de « faciliter » le changement par identification des variables d'action :

– identification des acteurs clés, des relais possibles et des pôles de résistance (impact humain du changement) ;
– identification des « cibles », c'est-à-dire des individus les plus concernés (impact organisationnel du changement).

Il est ensuite utile de formaliser un « plan de transition » explicite qui organise et coordonne les données humaines (nouveau schéma relationnel client/fournisseur), et de mettre en place une « structure d'accueil des problèmes » afin d'enregistrer les suggestions ou de légitimer les craintes des « cibles ». Enfin, il importe de montrer au plus vite les aspects positifs du changement, en terme de performances mesurées, d'objectifs atteints, de façon à créer vite une dynamique irréversible.

Afin d'aider à la conduite du changement, nous allons présenter deux outils méthodologiques complémentaires : le benchmarking (§ 10.1.3) et le reengineering (§ 10.1.4).

10.1.3 Le benchmarking, outil d'amélioration

❑ Définition et approche anglo-saxonne

Le benchmarking est une démarche continue et systématique permettant à une entreprise d'évaluer et de comparer ses performances en terme de qualité, de productivité et de pratique avec les entreprises qui représentent l'excellence. Soit dans le seul domaine concerné (benchmarking compétitif ou sectoriel), soit tous secteurs confondus (benchmarking généralisé), soit entre unités du même groupe industriel (benchmarking interne).

La raison d'être de la démarche consiste dans la compréhension et l'apprentissage des méthodes existantes les meilleures, afin d'améliorer une position stratégique et de mieux satisfaire ses clients. Le benchmarking consiste à être assez modeste pour reconnaître que d'autres sont meilleurs, et assez intelligent pour identifier et mettre en œuvre les moyens de les dépasser. Il repose sur le partage d'informations entre partenaires. Cette transversalité est à la fois sa richesse et sa faiblesse. Sa richesse est avérée dans les pays anglo-saxons en tant qu'outil d'amélioration des processus. Sa faiblesse repose sur la forte réticence culturelle française à échanger des informations stratégiques concernant la vie des entreprises.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Le benchmarking de la fonction maintenance

Peu pratiqué en France, le benchmarking se prête pourtant bien à l'amélioration de l'efficacité de la maintenance, beaucoup de responsables ayant à « réinventer la maintenance », parfois en autodidactes et tout en étant cloisonnés dans leur entreprise.

L'AFIM et le BIPE (observatoire de la maintenance) cherchent à créer des clubs de benchmarking dédiés aux responsables de maintenance, mais en les adaptant à la mentalité française, ce qui revient à collecter des informations et à les mettre sous forme d'indicateurs anonymées. Derrière la cohérence des indicateurs, il est possible d'identifier les facteurs clés de succès et les axes de progrès associés. En matière de changement d'organisation de la maintenance, il doit être ainsi possible d'éviter les changements inefficaces dus à des effets de mode et les erreurs de management du changement.

Une expérience de benchmarking sectoriel a été menée au niveau européen, dans le secteur des fonderies par un consortium de 15 fonderies PME, afin de dégager les lignes d'une nouvelle organisation rationnelle de maintenance : c'est le projet TOMAS (*total maintenance system for foundry operation*). La démarche a consisté :

– en une analyse qualitative comparée des services internes de maintenance existants;
– en une analyse quantitative de ratios prédéterminés évaluant les performances de la maintenance.

Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence les points faibles de ces fonderies et de déterminer des axes d'actions prioritaires, dont la préconisation d'appliquer la méthode MBF (voir § 10.3).

Mais mettre « cartes sur table » au bénéfice de tous, ou des plus malins, n'est pas encore passé dans les mœurs, certains secteurs (l'industrie agroalimentaire par exemple) souffrant souvent d'une « pathologie du secret » peu compatible avec l'ouverture transversale que nécessite le benchmarking.

❑ Méthodologie du benchmarking

La figure 10.2 montre les cinq étapes relatives à la conduite d'une opération de benchmarking.

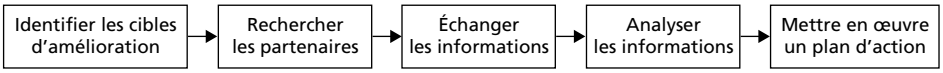


Figure 10.2 – Les cinq étapes du benchmarking

1. Recensement des opérations, fonctions ou organisations qui ont un potentiel d'amélioration

La cible d'amélioration peut être large (l'ensemble de l'organisation) ou réduite à un processus particulier. L'avis négatif des clients internes peut être une source intéressante à recueillir, ainsi que les performances insuffisantes aussi bien au niveau des personnels, de la logistique, de l'organisation que de la productivité.

2. Recherche des partenaires

Il s'agit d'identifier des entreprises ayant la réputation d'être performantes dans le domaine à améliorer, et pour lesquelles une comparaison de performances est

possible. Tous les moyens actuels d'information (bases de données, rapports publiés, statistiques, réseaux d'entreprises et organisations professionnelles) peuvent aider à cette recherche d'un partenaire, qu'il faut ensuite approcher.

Il faut alors le contacter, lui demander son accord et lui proposer un partenariat de benchmarking bilatéral autour d'une structure d'interface pour un échange ouvert d'informations, et non pour un espionnage industriel. La signature d'un accord de benchmarking avec clause de confidentialité est d'ailleurs possible. La possibilité de refus existe, expliquée par l'ignorance de la méthode, par un manque de disponibilité, par la crainte d'évasion de secrets de fabrication, par une autosuffisance qui amène à penser que l'on n'a rien à apprendre des autres.

Autre possibilité : multiplier les accords bilatéraux (mais il y a peu de « meilleurs » !) ou participer à un « club de benchmarking » sectoriel ou général.

3. Échanger les informations utiles

C'est d'abord en interne qu'il faut recueillir les informations utiles, caractérisant le domaine que l'on a choisi d'améliorer. Cette collecte interne permet de comprendre sa propre performance, avant de comprendre la performance du partenaire. Elle permet aussi d'établir le référentiel de comparaison. D'autres sources d'information peuvent être explorées, avant d'établir le cadre de travail du benchmarking. Ce cadre est matérialisé par un questionnaire de demandes d'explications testé en interne. Alors peut avoir lieu l'échange d'informations avec le partenaire lors d'une réunion formelle, complété éventuellement par des entretiens téléphoniques, courriers ou visite en tête-à-tête. Il reste à rassembler les informations fournies et à les analyser.

4. Analyser les informations et diagnostiquer

Après classement et mise en forme des informations, il faut établir des comparaisons, analyser les écarts et identifier les causes de moins bonne performance chez soi, de meilleures performances du partenaire. Ce diagnostic établi, le jeu consiste à reconstituer les facteurs de réussite du partenaire, puis à réfléchir à leur mise en œuvre adaptée à notre environnement.

5. Prendre les mesures de mise en œuvre des axes d'action comme un projet normal de l'entreprise

Il reste à transcrire le potentiel d'amélioration analysé en résultats tangibles, à partir d'un projet structuré d'entreprise accepté par la Direction. Il importe d'expliquer les résultats de l'étude de benchmarking aux « cibles », personnes spécifiquement concernées par le changement proposé. Le plan « benchmarking » sera proposé, évalué en temps et en coûts, planifié et piloté comme tout projet d'entreprise.

10.1.4 Le reengineering, outil de réorganisation

❑ Objectif et principe de base du reengineering

L'objectif du reengineering est la réorganisation d'une entreprise par mobilisation interne dans l'optique d'une meilleure satisfaction du client. Pour les réfractaires à la langue anglaise, nous pourrons parler de « reconfiguration » ou de « remise à plat » d'une entreprise ou d'un service.

Le principe est de rompre avec une culture traditionnelle « verticale » de l'entreprise, dans lesquelles les fonctions sont cloisonnées et peu interactives, pour

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

instaurer une culture « horizontale » établie sur la relation systémique élémentaire « entrée/sortie » ou « client/fournisseur ».

Le modèle vertical est peu réactif, centré sur lui même et non sur le marché, chaque fonction ayant tendance à défendre ses intérêts (son « territoire ») plus que l'intérêt général. Le modèle horizontal est construit sur éléments clés : le client, l'organisation, le fournisseur.

Remarque

La démarche TPM (maintenance productive totale) correspond parfaitement à cet objectif d'association des trois fonctions production, maintenance, qualité en vue de la satisfaction du client.

❑ Les domaines de performance

Le reengineering est une technique importée des États-Unis, centrée sur la conduite humaine du changement appliqué à 4 niveaux de performance et devant satisfaire à 4 exigences de performances, d'où les 16 paramètres de développement mis en matrice (tableau 10.1).

Tableau 10.1 – Les fondements de l'entreprise

Niveaux	Exigences				
	Culture	Architecture	Management	Objectifs	
Le groupe	1	2	3	4	Sommet de l'organisation
L'unité stratégique	5	6	7	8	Domaine à reconfigurer
Le processus	9	10	11	12	Chaîne d'activités
L'acteur	13	14	15	16	Performance humaine

La culture horizontale repose sur la satisfaction des besoins du client : c'est le guide unique de toutes les prises de décision à l'intérieur de l'entreprise.

L'architecture est la colonne vertébrale du système. Au niveau de l'unité stratégique, elle définit les relations client/fournisseur existant entre les fonctions. Au niveau du processus, elle définit les étapes à valeur ajoutée par lesquelles les entrées sont transformées en sorties. Au niveau des acteurs, elle définit leurs responsabilités et précise leur environnement.

Le management assure le choix, la faisabilité et la réalisation des objectifs.

Les objectifs précisent les cibles que chaque niveau de performance doit atteindre, de façon réaliste et mesurable.

Il découle de cette matrice la nécessité de définir chacun des 16 paramètres de développement du reengineering, ce qui correspond à la mise au point de la stratégie. La conduite du changement est de nature semblable à celle décrite au paragraphe 10.1.2, le principe étant de considérer la phase transitoire du reengineering comme un processus à part entière.

De cette technique de « management du changement », ambitieuse mais à la limite du champ d'application de cet ouvrage, retenons l'idée « que l'organisation horizontale doit être centrée sur la relation client/fournisseur » et conseillons la lecture dans (BRU 95) du chapitre « Redessine-moi l'entreprise ».

10.2 TPM : maintenance productive totale

10.2.1 Histoire des organisations de la maintenance et de la TPM

❑ Le modèle japonais

Le concept TPM date de 1971 et il est japonais. JMA (Japan Management Association) est alors un important cabinet conseil créé par des grands groupes japonais avec l'aide d'universitaires. JMA crée en 1969 le JIPE (Institut japonais de maintenance industrielle) qui fait la promotion de la TPM par S. Nakajima, dont les ouvrages ont été traduits en France en 1984 et 1986 (voir NAK 86). Le constructeur Toyota et l'équipementier Nippon Denso (prix PM 1971) sont les pionniers de la mise en pratique de la TPM.

Notons le poids de « l'école Toyota », initiatrice du *kanban*, du *Just in time*, de la *Total Quality Control*, du SMED et de la TPM, autant d'outils convergents vers l'amélioration du rapport qualité/prix à partir d'une démarche participative. Tous ces outils furent des facteurs influents du « miracle japonais » des années 1980, TQC et TPM étant deux démarches semblables et complémentaires (0 panne et 0 défaut) de qualité totale impliquant tous les acteurs dans la réussite de l'entreprise.

> **Remarque**
>
> Une émission de TV Tokyo (août 1982) fut consacrée à la diffusion explicative du concept TPM. À quand une émission de TF1 ou de F2 sur la TPM ?

❑ Les origines de la TPM

Jusqu'en 1950 se pratiquait aux États-Unis la « *breakdown maintenance* », dite « réparatrice ». En France, les services « entretien » assuraient la fonction dépannage-réparation. Le développement de la maintenance préventive débute vers 1950 aux États-Unis; la maintenance productive date de 1954. C'est en 1958 que John Smith vient au Japon enseigner la PM (*productive maintenance*). La TPM est donc une adaptation japonaise (1971) de la PM américaine. L'ajout du mot « total » a trois significations majeures :

– la TPM est un système global et transversal (ingénierie + production + maintenance + qualité) que certains (PIM 91) traduisent à cet effet par « management productif total »;
– la TPM concerne tous les niveaux hiérarchiques, des dirigeants aux opérateurs;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– la TPM comprend l'automaintenance, c'est-à-dire la participation des exploitants à certaines tâches de maintenance. Nakajima y ajoutait l'approche par cercles de qualité pluridisciplinaires.

Nakajima avait l'habitude de caractériser la PM avec humour : « toi tu fabriques, moi je répare ! » symbolisant ainsi le conflit latent production/maintenance que la TPM permet de dépasser. La TPM a concerné de plus en plus d'entreprises au Japon, puis a essaimé en Extrême-Orient (Corée du Sud, Taïwan, Singapour)

Dans les années 1980, pour faire face à la formidable expansion japonaise dans les secteurs électroniques et automobiles, les Américains, puis les Européens reprirent à leur compte les concepts TQC et TPM en les adaptant à leurs environnements et à leurs ressources humaines.

Exemples français

La « topomaintenance » est une marque déposée 1975 par Sollac à Fos (sidérurgie).
La méthode MEG (maintenance exploitation globale) chez Renault-Sandouville date de 1989.
Le plan « Mercure » de Citroën (qualité totale et TPM) date de 1989.
Kodak, SNR, Pernod, Schlumberger, Valéo et bien d'autres ont réalisé des expériences TPM différemment fructueuses dans les années 1980-1990. Depuis cette date, tous les groupes industriels ont expérimenté plus ou moins totalement la TPM, dont les PME/PMI commencent à s'inspirer (voir § 10.5, Un modèle d'organisation pour les PME).

10.2.2 Définitions et enjeux de la TPM

❑ **Définitions de la TPM**

☐ **D'après Nakajima**

Il est normal de faire d'abord référence au promoteur de la méthode, qui définit la TPM en cinq points :

– la TPM a pour objectif de réaliser le rendement maximal des équipements ;
– la TPM est un système global de maintenance productive, pour la durée de vie totale des équipements ;
– la TPM implique la participation de toutes les divisions, notamment l'ingénierie, l'exploitation et la maintenance ;
– la TPM implique la participation de tous les niveaux hiérarchiques ;
– la TPM utilise les activités des cercles comme outil de motivation.

☐ **Autres définitions**

Proposons quelques définitions parmi les nombreuses qui ont fleuri ces dernières années :

– Renault : « TPM, c'est la recherche permanente de l'amélioration des performances des équipements de production par une implication concrète au quotidien de tous les acteurs » ;
– Sollac-Topomaintenance : « c'est un ensemble de principes et de méthodes s'inscrivant dans la démarche qualité totale. Elle doit mobiliser toute l'entreprise pour obtenir le rendement maximal possible des équipements sur toute leur

durée de vie. C'est aussi la prise en charge au quotidien par des acteurs solidaires pour maintenir ces outils en conformité » ;

– Automaintenance (projet CEN) : « maintenance exécutée par un utilisateur ou un personnel d'exploitation qualifié ».

❑ Enjeux de la TPM

Il est désormais avéré que la démarche TPM est longue à mettre en œuvre (3 à 5 ans) de par la forte implication humaine qu'elle implique. Et il est également avéré, de par sa pratique française, qu'elle a un fort impact sur la réduction des coûts et sur l'amélioration de la qualité. Mettre en place une démarche TPM ne se justifie que par les effets positifs à en attendre : ils concernent six domaines analysés dans la matrice du tableau 10.2.

Tableau 10.2 – Les effets positifs de la TPM

Effets « output »	Ressources « input »		Gains	Méthodes complémentaires
	Personnel	Équipements		
P production	XXX	XXX	+ + +	SMED (changement d'outillage)
Q qualité	XXX	XXX	+ + +	Maîtrise statistiques des procédés
C coûts	XXX	XXX	+ + +	
D délais	XXX	XXX	+ + +	JAT Juste-à-temps
S sécurité/ environnement	XXX	XXX	+ + +	
M motivation	XXX		+ + +	Management participatif
	Automaintenance	*TRS*		

Ce tableau met en évidence l'impact d'un projet TPM sur chacun des 6 domaines envisagés, le rapport effets/ressources mesurant la productivité.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ Production + Qualité + Délai

Le principe de base de l'amélioration du taux de rendement synthétique (*TRS*, voir § 10.2.4) d'un équipement repose sur l'identification, la mesure, puis la prise de mesures réduisant les « six grosses pertes ».

Ces pertes se rapportent aux arrêts (qu'ils soient sur pannes, fonctionnels ou induits), à la non-qualité et aux cadences (temps de cycles).

L'optimisation des plans d'action (automaintenance et maintenance systématique programmée) permet d'obtenir la maîtrise des équipements, donc des gains en rendement (P), en qualité (Q) et en réduction des délais (D).

☐ Sécurité + Motivation

L'outil privilégié est ici l'implication de toute la hiérarchie et de tous les acteurs (réunis en équipes autonomes) dans le développement du projet TPM, puis dans son application quotidienne en décloisonnant les fonctions.

La hiérarchie doit s'impliquer dans le positionnement du projet TPM dans le plan qualité totale (JAT, MSP) de l'entreprise, puis dans le diagnostic initial, l'animation du dispositif de pilotage, la capitalisation des résultats et la valorisation des acteurs. La pérennisation assurée, la hiérarchie doit se fixer de nouveaux objectifs de performances et répercuter sur d'autres secteurs la réussite mesurée et capitalisée (nouveaux équipements, nouveaux profils d'embauches, etc.). Les acteurs sont impliqués « en équipe » :

– dans l'organisation et la prise en responsabilité de leur « chantier » (ou « îlot », ou « installation » pour Nakajima, ou « UET – unité élémentaire de travail » pour Renault) ;
– dans l'identification des causes de non performance ;
– dans l'automaintenance qui contient une phase 5 S de « mise au clair » du chantier.

L'ensemble de cette responsabilisation permet un gain environnemental direct autour des acteurs et un moindre risque d'accident. L'enrichissement des tâches proposées (autoqualité sous MSP + automaintenance en TPM + conduite en JAT) est un facteur de valorisation professionnelle qu'il est indispensable de reconnaître et de valider.

☐ Coûts globaux

Réduire durablement les coûts sur la durée de vie des équipements :

– c'est réduire les pertes, donc les coûts indirects et les prix de revient ;
– c'est maîtriser la durée de chaque étape pour gagner au plus tôt ;
– c'est assurer la maîtrise des dépenses dans le respect des délais ;
– c'est mettre en place des indicateurs de performance économiques et opérationnels pour estimer les gains attendus et réalisés à travers les plans d'action.

En synthèse, preuve est faite que, là où la démarche TPM a été bien conduite, le gain de productivité justifie la démarche TPM.

Gain en productivité TPM = gains en effets TPM/gains en ressources

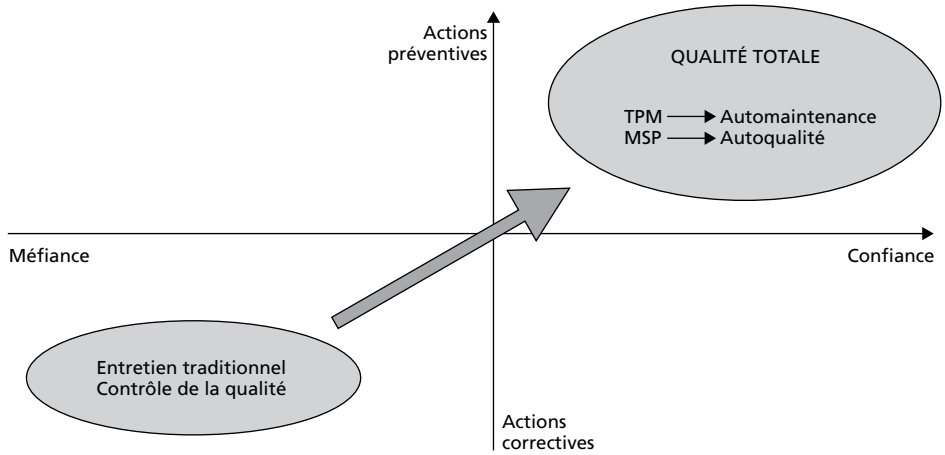


Figure 10.3 – La TPM s'inscrit dans une démarche de qualité totale

La TPM et la MSP (maîtrise statistique des procédés ou SPC américaine) ont en commun de reposer à la fois sur la prévention des pannes ou des défauts, et sur l'initiative d'opérateurs intégrés et mobilisés. Associé à la MSP dans une démarche « qualité totale », l'effet TPM est encore amplifié pour une meilleure compétitivité sur le marché et une meilleure satisfaction des clients.

10.2.3 Améliorer le rendement d'un équipement : les six sources de pertes

❑ Remarques initiales : quelques arguments pour la TPM

« Une machine est faite pour produire des pièces bonnes à sa cadence nominale pendant le temps requis. »

Il n'en est rien dans la réalité, les services maintenance du monde entier peuvent le confirmer. Nous avons même vu dans les années 1985 une entreprise du Bordelais investir logiquement dans une chaîne d'embouteillage de 6 000 bouteilles/heures, ayant une charge de 5 000 b/h à traiter. Au bout de 6 mois, l'évidence du manque de capacité était claire : la répétitivité de petits arrêts multicauses ne permettait pas de dépasser 3 000 b/h. D'où la mise en place d'un plan TPM afin de remonter la productivité ? Non, d'où l'investissement d'une deuxième chaîne de 6 000 b/h ! Solution peu concevable aujourd'hui.

Depuis que des mesures de durées d'arrêt en temps réel ont été effectuées sur des systèmes automatisés, il est prouvé que *le poids relatif des microarrêts, sur une période significative, est toujours supérieur au poids des quelques pannes durables* qui étaient la cible unique et traditionnelle de la maintenance préventive. Ces microarrêts représentent la cause majeure d'indisponibilité des systèmes, donc des coûts de perte de production. Et ils ne s'arrangent pas tout seuls. Et ils dégénèrent parfois en pannes durables.

L'objet de la TPM est donc de s'attaquer à la vraie cible : des événements longtemps considérés (faute de mesures objectives) comme mineurs, et négligés à ce titre. De

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

plus, les causes des microarrêts répétitifs sont multiples, et concernaient des fonctions distinctes :

– la machine est déréglée, c'est le régleur (la production) ;

– la glissière a du jeu, c'est le mécanicien (la maintenance) ;

– la machine « bourre », c'est l'opérateur (la production) ;

– le relais thermique a « sauté », c'est l'électricien (la maintenance) ;

– et qui doit nettoyer le « fin de course » ?

Ajoutons la perte de temps (l'arrivée du dépanneur) au mauvais climat engendré par la lutte latente ou exprimée des fonctions et des responsabilités « je répare, tu casses » ou « je produis, tu répares » et nous trouvons l'une des raisons d'être de la TPM : qu'importe la couleur de l'intervenant, puisque l'objectif commun est que la production reparte, et que la raison de l'arrêt soit éliminée. Nakajima écrivait : « production et maintenance sont les deux roues de la charrette ». D'où la création d'équipes de chantier autonomes et polyvalentes.

❑ Les six sources de pertes de performance

□ Situation des pertes de temps de productivité

Les pertes de performances que nous allons étudier se mesurent ou se ramènent à des « temps » perdus. Il faut avoir à l'esprit qu'ils génèrent des « coûts » perdus eux aussi.

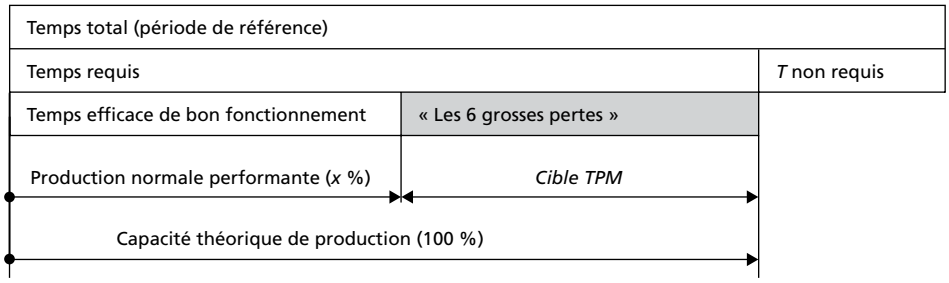


Figure 10.4 – Situation temporelle des « six grosses pertes »

Le temps total de référence

Le temps total hebdomadaire est de 24 heures × 7 jours = 168 heures. Le temps total annuel est de 24 heures × 365 jours = 8 760 heures. L'organisation sociale du travail ainsi que l'organisation interne et les plans de production réduisent ce temps « idéal » à un temps « requis », pendant lequel le système est supposé répondre à la demande.

Le temps non requis (T_{nr})

Il peut comprendre :

– des périodes volontaires de non-fonctionnement (rythmes de travail en 1 × 8 ou 2 × 8, par exemple) ;

– des arrêts volontaires planifiés (révisions périodiques par exemple) ;

– des temps d'inoccupation (chômage technique par exemple) ;
– de la maintenance planifiée en dehors du temps requis.

On se référera au paragraphe 6.2.3 et aux figures 6.9 et 6.10.

Remarque

L'équipement peut être disponible ou non pendant le T_{nr}.

Le temps efficace de bon fonctionnement

C'est la durée pendant laquelle l'équipement fonctionnant à sa cadence nominale fournit des « pièces bonnes » à son client.

□ Nature des pertes de temps de productivité

Les six « grosses pertes » ont été classées en trois familles dans une logique TPM, c'est-à-dire sans se soucier des fonctions (production, maintenance, qualité) responsables ou victimes de ces pertes.

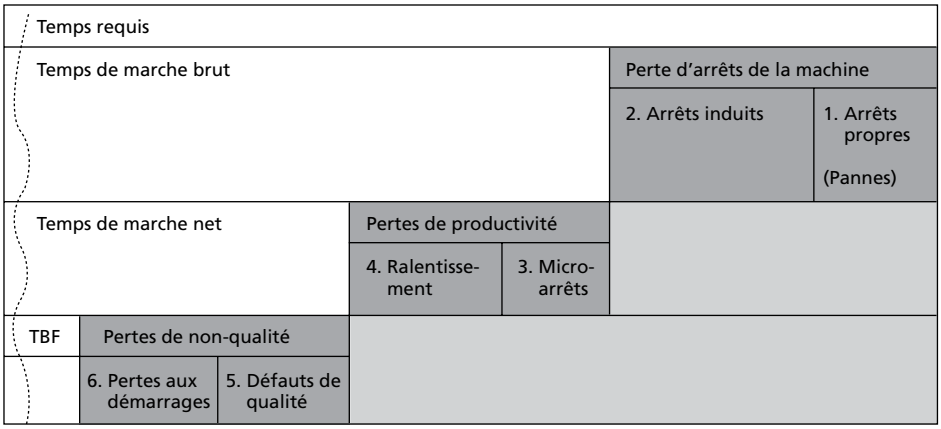


Figure 10.5 – Zoom sur la nature des « six grosses pertes »

Avant d'identifier les champs d'action pour prévenir ou pour remédier à chacune des pertes, analysons plus finement quelle est leur nature possible.

1. Arrêts propres sur pannes

Parfois nommées « pannes durables » (> 10 minutes pour Nakajima) par opposition aux « microdéfaillances » de type 3, elles concernent le plus souvent l'équipement, mais aussi l'outillage. Ce sont les temps propres d'indisponibilité (MTI) pris en compte dans l'estimation de la disponibilité de l'équipement, associés alors aux microdéfaillances (3). Leur traitement concerne la maintenance corrective.

Remarquons que les « avaries graves » (catastrophes exceptionnelles) entraînant des dommages matériels ou corporels graves et des durées de réparation longues, doivent être traitées séparément, puisque statistiquement non significatives (anormales).

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

2. Changements et arrêts induits

Ces arrêts machines sont extrinsèques, généralement liés à l'organisation et aux aléas de la production.

Les changements d'outils (usure, réglage) ou de production (reformatage, rafale, changement d'outillage, etc.) engendrent des arrêts auxquels il faut ajouter les temps de réglages et des adaptations nécessaires. La stratégie SMED (*single minute exchange die*) est la réponse adaptée, ainsi que la gestion cohérente de production. Notons que la « flexibilité » de l'équipement est un critère à intégrer à la conception, face au besoin de réactivité aux demandes des clients.

Les arrêts induits concernent la saturation (problème en aval) ou le désamorçage (problème en amont), les manques de pièces, de ressources externes ou de main-d'œuvre.

3. Microarrêts

Une grande quantité de causes arrêtent la production pour des durées très courtes, mais fortement répétitives : bourrage, déréglages, arrêts pour redresser un produit qui se présente mal ou pour ramasser un produit tombé, alimentation de la machine en ingrédients (colle, étiquettes, etc.). Chaque machine automatisée a ses arrêts particuliers, la difficulté consistant à saisir objectivement ces courtes durées et à qualifier chacune des causes aux fins d'amélioration. L'aide des opérateurs est ici incontournable.

4. Ralentissements et « marches à vide »

Il est assez difficile d'évaluer les pertes de production dues aux ralentissements variables, ou au choix d'une cadence inférieure au nominal (mode dégradé par exemple), ou aux marches à vide. Un compteur horaire n'est dans ce cas d'aucune utilité sauf s'il est corrélé avec un compteur de quantités produites. Remarquons qu'il en est des machines comme des voitures : conduites en permanence à leur limite de performance, leur taux de défaillance est (naturellement) supérieur au taux qu'elles auraient en performances réduites, et leur vieillissement est accéléré. Ce qui signifie que l'indicateur « disponibilité propre » est à moduler par l'indicateur « cadence moyenne » sur la même période de référence.

5. Défauts de qualité

Nous sommes là devant la pire perte : mieux vaut un équipement en panne qu'un équipement qui consomme de l'énergie, des matières et de la main-d'œuvre pour fabriquer des pièces non vendables et dont il faut payer en plus la destruction ou la réfection.

6. Pertes au démarrage

Le démarrage ou le redémarrage après arrêt entraîne sur de nombreux process une période transitoire (à mesurer) de fabrication de produits hors qualité. Que reste-t-il de notre temps requis après lui avoir soustrait tous les temps relatifs aux pertes envisagées ci-dessus ? C'est ce que le taux de rendement synthétique va mettre en évidence.

$$TRS = \frac{\text{Temps efficace de bon fonctionnement}}{\text{Temps requis}} = \frac{\text{Temps requis} - \sum \text{Pertes}}{\text{Temps requis}}$$

☐ **Agir sur les causes de non-performance**

Chacune de ces six pertes est à évaluer en criticité relative de façon à déterminer des priorités pour les améliorations à apporter. Quelques idées clés de la TPM :

– minimiser les pertes en temps réel, par action rapide des équipes autonomes d'opérateurs polyvalents chargés de la conduite, de l'autoqualité et de l'automaintenance sur leur chantier ;

– supprimer les causes de pertes par la réflexion en temps différé d'un groupe polyvalent et pluridisciplinaire, pouvant prendre la forme d'un cercle de qualité ou d'un groupe d'analyse de panne (« le module hebdomadaire » du plan Mercure de Citroën). Ce groupe de réflexion-action a la charge du diagnostic de la perte ciblée, puis de la proposition d'axe d'amélioration (fiabilisation technique et organisation principalement). Les mesures de *TRS* mettront en évidence les progrès obtenus, affichés sur le chantier ;

– mettre en œuvre les cinq mesures antipanne préconisées dans NAK 86 :
  – satisfaire les conditions de base (nettoyage, lubrification, resserrage, etc.) ;
  – respecter les conditions d'utilisation ;
  – remettre en état toutes les dégradations ;
  – améliorer les déficiences de conception ;
  – prévenir les déficiences humaines ;

– les actions améliorantes précédentes, suivant leur nature, peuvent concerner aussi bien la production-exploitation que la maintenance et la qualité, ce partage de responsabilité étant fédéré par l'objectif commun : produire mieux pour satisfaire le client.

10.2.4 Le taux de rendement synthétique (TRS)

Le *TRS* est un indicateur de performance d'un équipement, également nommé taux de rendement global ou rendement opérationnel (*RO*). Si sa structure est toujours de la forme $TRS = \pi_1 \cdot \pi_2 \cdot \pi_3$, ses composantes sont variables en nature de saisies, en mises en familles et en désignation. Elles représentent toujours les « six grosses pertes » que la TPM a pour vocation de mesurer pour mieux les réduire.

❑ **Les composantes du *TRS***

☐ **Forme générale de l'indicateur *TRS***

La formule du taux de rendement synthétique est (figure 10.6) :

$$TRS = \frac{OD}{OA} = \frac{OB}{OA} \times \frac{OC}{OB} \times \frac{OD}{OC}$$

Taux de rendement synthétique = Taux brut de fonctionnement τ_1 ×
Taux net de fonctionnement τ_2 × Taux de qualité τ_3

Valeur d'excellence : $TRS > 0{,}90 \times 0{,}95 \times 0{,}99 = 0{,}85$.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

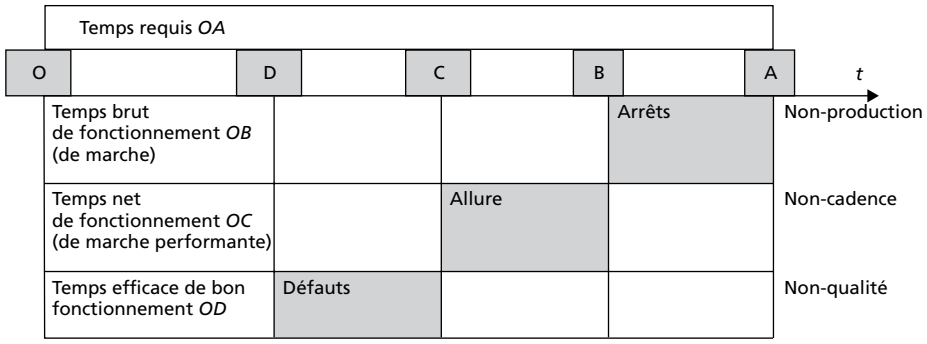


Figure 10.6 – Structure du *TRS*

Exemple

$$TRS = 0{,}84 \times \mathbf{0{,}59} \times 0{,}98 = \mathbf{0{,}485}$$

Interprétation : on se rend compte que la faiblesse d'un seul taux, caractérisant l'impact des pertes par microarrêts répétitifs, fait chuter la production « utile » à moins de 50 % de la production théorique, ce qui n'est pas compétitif !

☐ Taux brut de fonctionnement : pertes par arrêts

$$\frac{OB}{OA} = \frac{\text{T requis} - \sum \text{T arrêts}}{\text{T requis}} = \frac{\text{T de marche}}{\text{T requis}} = \tau_1$$

Valeur d'excellence : > 0,90.

Le temps requis est la durée pendant laquelle l'équipement est censé produire. Les temps d'arrêts doivent être discriminés lors de leur saisie en temps d'arrêt propres (sur pannes) et en temps d'arrêt pour causes externes :

– en temps d'arrêt induits par l'interdépendance des machines,

– en temps d'attente,

– en temps d'arrêt pour changement de production (reformatage) ou d'outillage.

Il est alors possible de décomposer le taux brut en deux ou trois taux composants, dont la disponibilité propre relative aux temps d'arrêts propres.

Remarque

Renault nomme « disponibilité opérationnelle » $D_{op} = \tau_1$ quelle que soit la cause d'arrêt, intrinsèque ou externe.

☐ Taux net de fonctionnement : pertes par ralentissements

$$\frac{OC}{OB} = \frac{\text{Temps de cycle réel} \times \text{quantité produite}}{\text{Temps de marche}} \times \frac{\text{Temps de cycle théorique}}{\text{Temps de cycle réel}} = \tau_2$$

$$= \quad \text{Taux de marche performante} \quad \times \quad \text{Taux d'allure}$$

Valeur d'excellence : > 0,95.

Nakaigawa (association japonaise de management) a inventé cet indicateur « taux d'allure », rapport de la capacité nominale de l'installation par rapport à l'allure réelle mesurée. Ce taux d'allure est également nommé le « rendement vitesse ».

Le taux de marche performante caractérise la stabilité de marche, perturbée par les microarrêts répétitifs qui ne sont pas toujours relevés ni quantifiés ni identifiés. Et encore moins diagnostiqués ni prévenus ou supprimés. Ce sont eux qui sont la cible privilégiée de l'automaintenance et des GAP.

☐ Taux de qualité : pertes par défauts

$$\frac{OD}{OC} = \frac{\text{pièces entrées} - \text{pièces défectueuses}}{\text{pièces entrées}} = \tau_3$$

Valeur d'excellence : > 0,99.

L'amélioration du taux de qualité passe par les techniques de la TQC (*total quality control*) et spécifiquement par la MSP (maîtrise statistique des procédés). Sur certains process, la part des « pertes au démarrage » peut n'être pas négligeable, cette perte étant accentuée par la tendance à plus de flexibilité et la réalisation de séries courtes.

❑ Application numérique d'évaluation du *TRS*

☐ Données nécessaires

Traitons un exemple relatif à une journée d'activité, le suivi du *TRS* se faisant habituellement de façon hebdomadaire aux fins d'exploitation par un groupe d'analyse de pannes (GAP, voir § 10.5.3).

a. Temps requis : 8 heures ou 480 minutes.
b. Temps de marche mesuré : 403 minutes (saisie des 77 minutes d'arrêt).
c. Temps de cycle théorique : 0,6 minute par pièce.
d. Temps de cycle réel mesuré : 0,8 minute par pièce.
e. Pièces traitées (entrées) : 395.
f. Pièces défectueuses : 8, donc bonnes : 387.

☐ Évaluation du *TRS*

Taux brut de fonctionnement : 403/480 = **0,84** = τ_1.

Taux d'allure : 0,6/0,8 = 0,75.

Taux de marche performante : 0,8 × 395/403 = 0,78.

Taux net de fonctionnement : 0,75 × 0,78 = **0,59** = τ_2.

Taux de qualité : 387/395 = **0,98** = τ_3.

Taux de rendement synthétique : ***TRS*** = **0,84** × **0,59** × **0,98** = **0,485**.

> **Remarque**
>
> Production théorique idéale : 480 minutes/0,6 = 800 pièces bonnes.
> Production réelle de pièces bonnes : 387, ce qui permet d'évaluer très rapidement le TRS : 387/800 = 0,485.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ **Exemple d'interprétation**

La performance globale de la machine est catastrophique : il est temps de mettre en œuvre la TPM ! L'examen des trois composantes permet d'orienter vers les axes d'amélioration suivant :

– le taux brut n'est pas bon : $\tau_1 = 0{,}84$. L'analyse des causes d'arrêt nous montre que $0{,}84 = 0{,}97$ (arrêts propres) $\times$ 0,86 (autres arrêts). Donc la disponibilité propre de l'équipement n'est pas en cause (0,97), mais l'amélioration devra porter sur la fréquence des changements d'outillage et sur leurs durées ;

– le taux net est très mauvais : $\tau_2 = 0{,}59$. C'est l'axe des actions prioritaires. Le diagnostic met en évidence un nombre important de microarrêts (0,78), qu'il va falloir identifier pour le réduire, ainsi qu'un taux d'allure moyen situé aux 3/4 de la cadence nominale : à augmenter ;

– le taux de qualité $\tau_3 = 0{,}98$. n'est pas prioritaire quant à la productivité, mais peut ne pas être suffisant quant à la satisfaction de la clientèle.

❑ **Tableau de bord de suivi par le *TRS* : analyse de la non-performance**

Nous avons vu quelles sont les informations à saisir pour évaluer le TRS d'un équipement. Les plus délicates à obtenir concernent les microarrêts dont l'enregistrement temporel doit être automatique et l'imputation à une cause d'arrêt manuelle (par boîtiers Kienzle ou Souriau, codes à barres, API, etc.). Le traitement des infor-

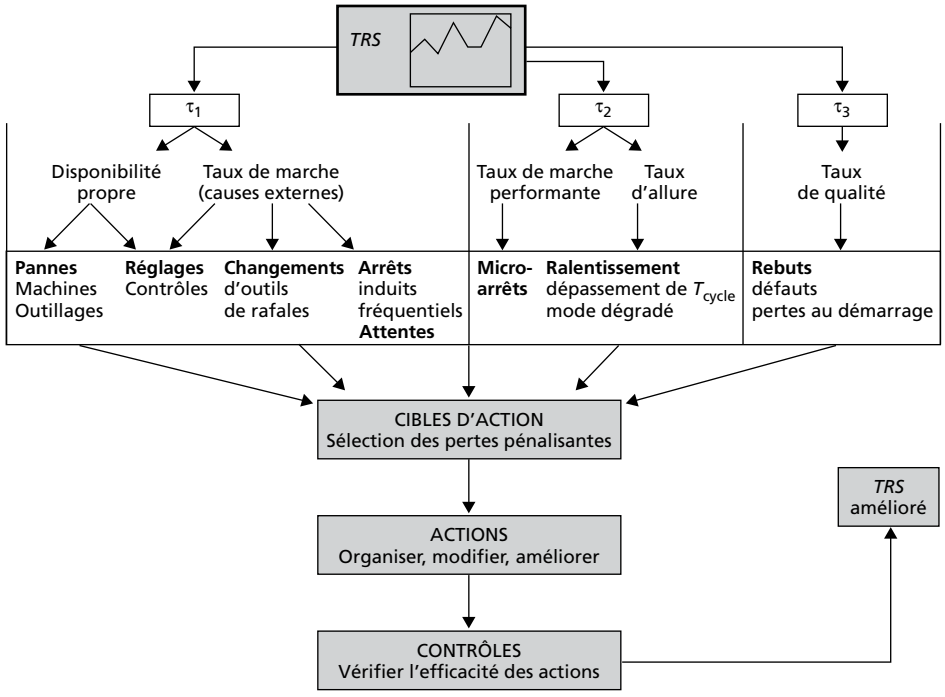


Figure 10.7 – Analyse descendante du *TRS* : les « pertes », cibles d'amélioration

mations montantes (résultats opérationnels d'une période de référence) permet de calculer le *TRS*. Les variations du *TRS* sont des indicateurs de tendance de productivité. L'analyse descendante du *TRS* vers ses composantes (figure 10.7 ci-contre) permet de cibler les points faibles à améliorer, qui peuvent concerner aussi bien la production (trop de changements d'outillage, par exemple), la maintenance (trop de pannes, interventions trop longues) ou la qualité (trop de défauts).

La visualisation des variations du *TRS* sur le chantier permet de montrer les améliorations résultant de l'effort collectif de tous les acteurs.

10.2.5 Développement d'un programme TPM : les 12 étapes

❑ **Développer un programme TPM complet ou allégé ?**

La conduite d'un projet TPM est toujours d'actualité, et même plus que jamais pour de nombreuses PME. L'efficacité de la démarche en 12 étapes proposée par Nakajima est largement éprouvée, au Japon comme en France, mais sa mise en œuvre est légitimement longue (3 à 5 ans) et lourde, car elle remet en cause l'organisation de la production et les mentalités des acteurs.

Nous allons décrire de façon détaillée la conduite du projet TPM « originelle » (NAK 86) dédiée à des groupes industriels (tableau 10.3), en sachant que des programmes allégés adaptés à l'échelle des PMI mais gardant la cohérence du programme d'origine peuvent être imaginés et expérimentés (voir § 10.5). En particulier, il est possible de dégager de l'ensemble TPM le seul principe de « l'automaintenance » (étape 8) qui sera traité à part (§ 10.2.6). Ou même, plus modestement, il est possible de développer un « projet 5 S » autonome (voir § 7.5.3), ce qui permet déjà d'éliminer une source majeure de pertes de productivité.

Tableau 10.3 – La TPM suivant les 12 étapes proposées par Nakajima

PHASES	ÉTAPES
A. Initialisation et préparation	1. Décision de la direction et déclaration d'objectif TPM 2. Formation de l'encadrement et campagne de promotion 3. Mise en place de la structure de pilotage 4. Définition de l'objectif, à partir de « l'état des lieux » 5. Élaboration du programme d'application de la TPM
B. Développement	6. Lancement (*kickoff*) du projet TPM 7. Identification et élimination des causes de pertes sur un chantier modèle 8. Développement de l'automaintenance par les exploitants (à partir des 5 S) 9. Développement de la maintenance programmée (plan de maintenance)
C. Pérennisation	10. Amélioration de la technicité des acteurs 11. Intégration des acquis sur la conception-machine (notion de *LCC*) 12. Label TPM et fixation de nouveaux objectifs

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

□ Exemple de planification d'un programme TPM (en 3 ans)

Les valeurs données sont indicatives, tirées de l'expérience des entreprises françaises ayant pratiqué la TPM. Il est bien évident que les durées de la phase B dépendent de l'état initial et de la complexité de chaque chantier. Par contre, l'enchaînement des tâches est toujours le même.

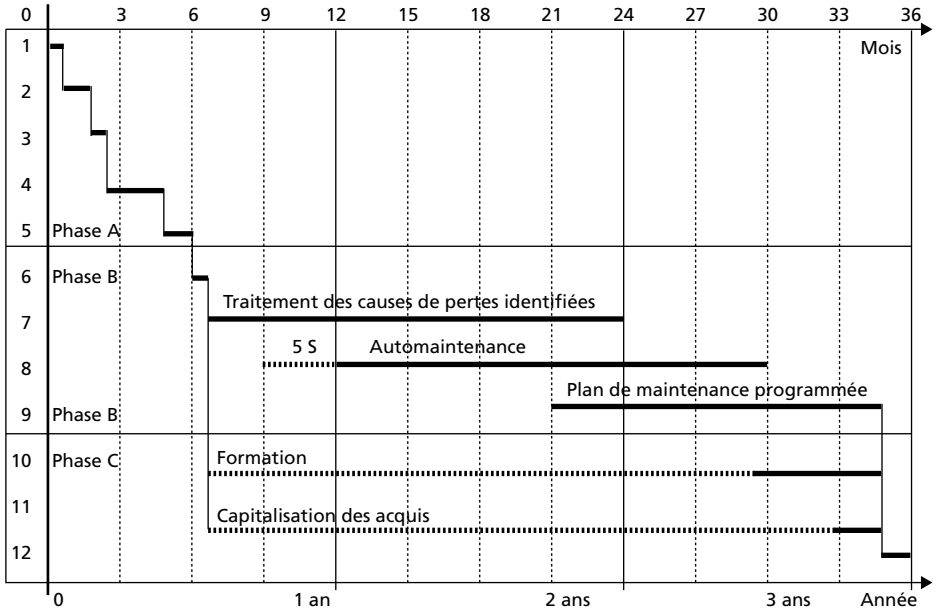


Figure 10.8 – Exemple de planification des étapes TPM

❑ Phase A : initialisation et préparation du projet TPM

□ Étape 1 : décision de la direction

La direction, de façon consensuelle, doit être convaincue du bien-fondé de la démarche TPM au moment de la décision de lancer le projet, et particulièrement la DRH (direction des ressources humaines), naturellement très impliquée dans ce projet socialement sensible.

La décision de la direction de développer un programme TPM doit être marquée par une déclaration à tout le personnel, avec publication dans le journal interne. Elle doit mettre en œuvre un plan de communication spécifique afin de promouvoir l'esprit TPM sur la durée du programme.

La direction doit dégager les objectifs de performance industrielle à atteindre et s'engager à soutenir la mise en œuvre de la démarche en lui allouant les ressources humaines et matérielles nécessaires.

□ Étape 2 : formation de l'encadrement

L'objectif est de faire de chaque membre de l'encadrement un membre actif de la mise en œuvre du programme. L'animation de la formation doit permettre à chaque

cadre de maîtriser le contenu général de la TPM sur le plan conceptuel, et de réfléchir à son adaptation aux spécificités de l'entreprise.

Remarque

Généralement bien vécue à la base, la TPM « accroche » parfois au niveau de la maîtrise. Mon expérience de formateur m'a montré que la résistance au changement vient plus des agents de maîtrise que des opérateurs. Il me semble essentiel de recueillir l'adhésion de la maîtrise, et de définir leur rôle spécifique dans la logique TPM : ils doivent devenir plus des animateurs, des « conseillers techniques » et des « faciliteurs » que des chefs et des contrôleurs. D'où un sentiment de « perte de pouvoir » qu'il faut resituer dans une logique de management participatif et de décloisonnement des fonctions traditionnelles. Pour éviter ce sentiment de « marginalisation », ils doivent bénéficier d'un programme de formation spécifique.

L'encadrement devra être particulièrement sensibilisé aux 5 S en tant que « base de l'édifice automaintenance ».

□ Étape 3 : mise en place de la structure de pilotage

L'objectif est de définir une organisation et des règles de fonctionnement formalisées afin de permettre le pilotage permanent du programme TPM. L'organisation sera « matricielle », verticale par les trois niveaux hiérarchiques, horizontale par les structures du projet TPM. Elle sera « transversale » par rapport aux différentes fonctions techniques. Le principe est que tout « leader » d'un niveau soit membre du groupe de niveau supérieur.

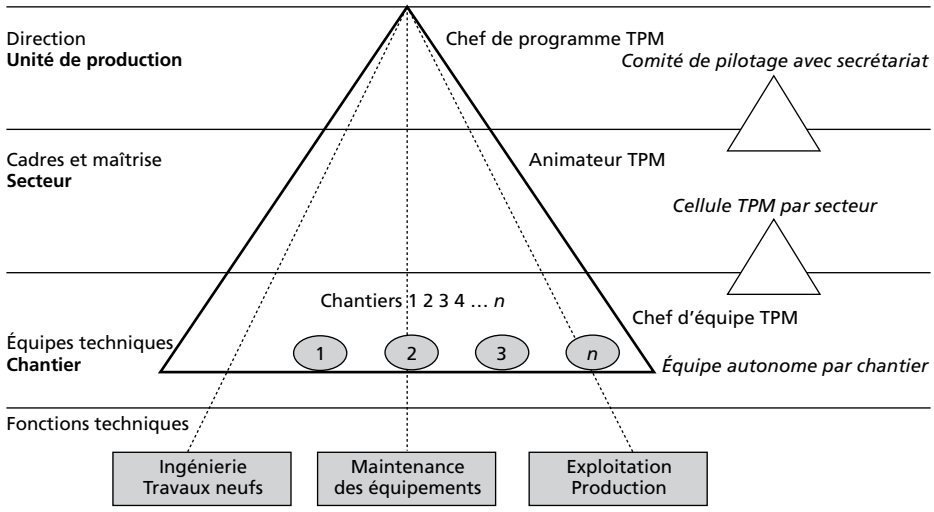


Figure 10.9 – Organisation verticale et transversale

Un chef de programme TPM doit animer un comité de pilotage pour l'ensemble du site. Le projet s'étalant sur plusieurs années, un secrétariat permanent et spécifique doit assurer les réponses aux besoins qui émergent au fur et à mesure du

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

développement du projet. Le comité de pilotage doit jouer son rôle d'animation, mais aussi de « conseiller technique » permanent pendant la durée du programme. Un animateur doit animer une cellule TPM par chantier. Cette cellule a pour mission :

– d'assurer la stabilité et la continuité de l'intégration des équipes au projet ;
– de capitaliser et de transmettre l'expérience acquise.

☐ **Étape 4 : définition de l'objectif en fonction de l'état des lieux**

L'objectif est d'évaluer au travers d'une reconnaissance approfondie sur le terrain :

– le périmètre du chantier, éventuellement la sélection d'une installation témoin ou pilote ;
– ses ressources humaines et logistiques ;
– les flux matières et la valeur ajoutée ;
– la criticité de chaque équipement ;
– les pratiques de la production et de la maintenance ;
– les niveaux de performances (temps de cycle, temps requis, quantité produite, etc.) ;
– les causes de non-performance et l'estimation rapide du *TRS* par le rapport « production bonne/production idéale » ;
– le potentiel d'amélioration et de gains.

Cet état des lieux initial doit se faire rapidement et donner lieu à un rapport de forme standard pour chaque chantier.

☐ **Étape 5 : élaboration du programme d'application de la TPM**

L'objectif est de formaliser un plan de travail initial (il sera réactualisé périodiquement) pour chacun des chantiers. Ce plan de travail est la suite logique de l'état des lieux base d'un diagnostic qui a mis en évidence des anomalies et des problèmes d'organisation relatifs au chantier. Le plan de travail doit aborder de façon réaliste :

– l'objectif de *TRS*, à partir du potentiel de réduction des pertes mesurées ;
– le pilotage : ressources, modalités, calendrier, besoins en soutien extérieur ;
– la structuration d'équipes polyvalentes, destinées à devenir autonomes, le chef d'équipe étant l'animateur TPM du chantier ;
– l'évaluation approximative des coûts de remise à niveau des équipements du chantier ;
– l'engagement signé des animateurs et chefs d'équipe, le bon déroulement du plan étant supervisé par le comité de pilotage.

❑ **Phase B : développement du programme**

☐ **Étape 6 : lancement du projet TPM**

L'objectif est de donner le « top départ » de la mise en œuvre par une étape d'information. Cette information est limitée à un secteur (un ou plusieurs chantiers voisins) et elle est destinée aux acteurs de tous les métiers concernés, opérateurs de premier niveau en particulier. Le lancement doit montrer :

– la chronologie des étapes, la logique de leur succession et la mise en œuvre des actions préparées ;
– le contenu de la première étape et le détail des actions par chantier ;
– comment chaque équipe va être associée à l'action, et le rôle de chacun ;
– le fonctionnement du GAP (groupe d'analyse de pannes, voir § 10.5.3) hebdomadaire permanent et des cercles de qualité éventuels ;
– les moyens d'évaluation des efforts de chacun et la revalorisation associée à l'enrichissement des tâches.

Cette étape doit être rapide, de façon à vite passer au concret de l'étape 7 de telle manière qu'il n'y ait plus aucun « spectateur » dans le périmètre du secteur.

Remarque : un aspect tactique

Lorsque le chef de programme TPM et les animateurs de secteurs sentent des résistances fortes, il est possible de choisir un « chantier » témoin, puis de lancer le plan TPM sur ce seul chantier. Cette « expérimentation » permet de montrer le bien-fondé de la démarche et de prouver que les bons résultats se manifestent rapidement. Cela pour emporter ainsi l'adhésion du plus grand nombre.
Un lancement réussi doit créer une atmosphère nouvelle (en rupture par rapport au passé) favorable aux modifications de comportement individuel et collectif.

□ Étape 7 : élimination des causes de pertes

L'objectif est d'éliminer les causes les plus évidentes de dysfonctionnement pour réaliser rapidement des gains de performance et pour obtenir l'adhésion des acteurs à la démarche à partir d'éléments concrets.

– Organisation d'un groupe de travail par chantier, constitué d'opérateurs, de dépanneurs et de cadres techniques qui utilisent les outils de résolution de problèmes, qui propose des solutions et qui les met en œuvre. Ce groupe de travail deviendra le GAP en phase pérennisée.
– La base de ce travail repose sur la mesure de performance (temps de cycle, nombre de pièces bonnes, temps requis) et sur l'identification des « six grosses pertes » (voir tableau 10.4).
– Pour analyser la « non-performance », la mise en œuvre des graphes de Pareto a le double avantage de montrer la hiérarchisation des problèmes et de participer à la « formation-action » des opérateurs.
– La mesure de la non-performance, les relevés des interventions de maintenance, l'avis des opérateurs et régleurs et l'avis des dépanneurs sont les données de départ permettant d'appliquer les méthodes de diagnostic et de résolution de problèmes. L'utilisation du diagramme d'Ishikawa en 5 M (matières, moyens, milieu, méthodes et main-d'œuvre) permet de découvrir les facteurs de non performance et leurs interactions.
– Une fois l'équipement « mis à niveau », il faut créer un dossier « d'état de référence » à partir de l'équipement mis en conformité et de son état technique satisfaisant constaté. L'état de référence est défini par les mesures de tous les paramètres « d'état normal » : temps de cycle, valeurs de réglage, de lubrification, électriques, hydrauliques, etc.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Remarque

La figure 10.8 (planning des étapes) montre que c'est à l'étape 7 que commence véritablement la « formation-action », qui sera avantageusement précédée ou accompagnée d'une indispensable formation aux outils de la qualité, aux méthodes d'amélioration permanente et de résolution de problèmes (voir la stratégie du GAF, groupe action-formation, § 10.5.4).

□ Étape 8 : développement de l'automaintenance

C'est l'étape déterminante pour la réussite du programme TPM. Elle implique l'association d'une démarche humaine et d'une démarche technique. Elle consiste en un travail progressif d'organisation comportant successivement :

– la prise en charge du chantier en 5 S ;

– la prise en charge progressive d'opérations simples de maintenance de premier niveau (fiches d'automaintenance) ;

– la formalisation d'un nouveau mode de conduite des installations, comprenant l'inspection systématique de l'état du moyen de production et sa mise à niveau systématique en cas de dégradation ;

– le transfert de tâches simples de maintenance systématique ;

– la tenue à jour d'un tableau de bord du chantier, géré par l'encadrement et visible sur le terrain.

Remarques

Notons l'intérêt de créer à proximité de chaque chantier un « point qualité », petit bureau « protégé » destiné aux opérateurs afin de remplir leurs fiches de travail, ranger la documentation de référence, se concerter et à l'extérieur duquel les résultats opérationnels du chantier sont affichés.

Cette étape est caractéristique de la démarche TPM. Elle doit se gérer, ainsi que l'étape 9, en collaboration avec les méthodes de maintenance, dans une transparence totale. Elle passe par un changement de comportement symbolisé par l'abandon progressif du « je produis, tu répares ».

Cette étape est spécifiquement développée au paragraphe suivant, 10.2.6, sur l'automaintenance.

□ Étape 9 : développement de la maintenance programmée

L'objectif est de définir des contenus techniques précis de maintenance préventive systématique destinés à couvrir les problèmes non traités en automaintenance. Un groupe de travail mixte production-maintenance piloté par un agent des méthodes de maintenance a pour mission l'établissement des gammes de maintenance programmée par niveau, suivant les méthodes habituelles :

– arborescence de l'équipement ;

– liste des composants sensibles ;

– définition des actions préventives par composant ;

– regroupement des actions par niveaux ;

– réalisation des gammes transférées au premier niveau, avec toutes les spécifications et procédures ;
– validation des gammes par une prise en responsabilité des opérateurs « assistés » par la maintenance. Les gammes seront standardisées dans leur présentation, rigoureuses et précises, simples et compréhensibles ;
– planification des tâches et formalisation d'un échéancier par chantier. Le contrôle et une bonne traçabilité des actions sont nécessaires. Une procédure d'audit peut être établie.

N'oublions pas que le transfert souhaité est davantage du correctif vers le préventif que de la maintenance vers l'exploitation.

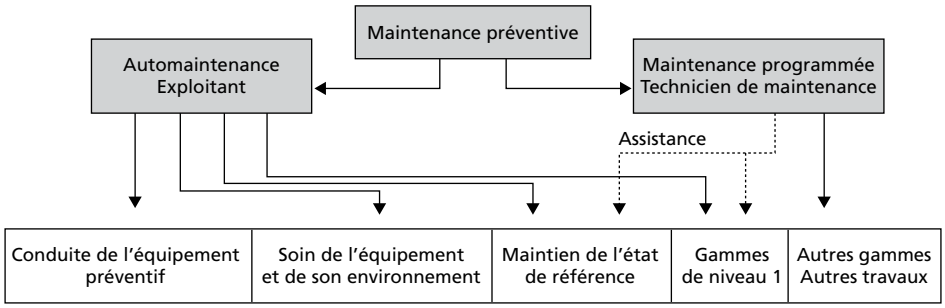


Figure 10.10 – Répartition des tâches préventives en TPM

Le maintien de l'état de référence s'effectue par surveillance des paramètres de normalité définis en fin d'étape 7.

Remarque

Les techniciens de maintenance doivent alors faire face à un pic d'activité avant que le transfert de tâches ne soit effectif. En effet, les DT relatives aux mises à niveau se superposent aux aspects « pédagogiques », les techniciens de maintenance ayant vocation TPM à servir de « soutien » aux opérateurs.

❑ Phase C : pérennisation de la TPM

☐ Étape 10 : amélioration de la technicité des opérateurs

L'objectif de cette étape est de consolider les acquis par le perfectionnement continu des personnels d'exploitation et de maintenance, aussi bien pour les opérateurs que pour les chefs d'équipe et la maîtrise.

La formation est continue à partir de l'étape 7, la participation des opérateurs à l'identification des causes de pertes étant particulièrement riche pour découvrir l'aspect « diagnostic ». C'est en fin de programme qu'une séquence spécifique de formation permet de consolider et de pérenniser les acquis « expérimentaux » des étapes précédentes.

Un programme de formation cognitive, comme le Tanagra utilisé pour les agents de niveaux CAP-BEP de Renault-Flins, doit être complété par une formation technique

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

(maîtrise du grafcet, des plans et des schémas, pathologie des équipements) et une formation systémique (compréhension du processus usine).

> **Remarque**
>
> J'avais été surpris, alors que je formais des opérateurs à la TPM chez IBM en 1984, de découvrir qu'ils ignoraient généralement la nature des flux d'entrée et de sortie de l'atelier d'insertion de composants dans lequel certains travaillaient depuis 15 ans.
> Ils n'avaient identifié ni la valeur ajoutée de leur travail, ni la régulation de leur atelier, ni leurs clients. D'où une initiation à la logique systémique qui s'est avérée très positive pour la perception de leur rôle et pour leur motivation dans le cadre de l'automaintenance et de l'autoqualité.

☐ Étape 11 : intégration des acquis sur la conception-machine

L'objectif est d'organiser le retour d'expérience du service méthodes de maintenance vers le service ingénierie-travaux neufs ou plus en amont jusqu'au concepteur de l'équipement. Ce retour d'expérience concerne les enseignements et les acquis tirés de la pratique TPM des chantiers. En particulier, il permet de remonter des informations précises afin de :

– reconduire l'existant qui donne satisfaction ;

– ne pas reconduire les faiblesses constatées ;

– remonter les solutions expérimentées et éprouvées.

Le retour d'expérience TPM permet également de préparer et de lancer des modifications lourdes, voire une rénovation des machines « non capables » au sens de la disponibilité (ou au sens de la qualité dans le cas d'un jumelage avec la MSP du programme qualité).

☐ Étape 12 : label TPM et nouveaux objectifs

L'objectif du « label chantier TPM » est de valider l'organisation imaginée et testée, de valider le gain en performances mesurées et de reconnaître la qualité du travail effectué par l'équipe du chantier. Le label est la marque de fin de parcours des 11 étapes précédentes associée au respect de l'objectif *TRS* alloué. Un audit de bon fonctionnement (dont la teneur est connue de tous) précède l'attribution du label, qui peut être décerné suivant un certain « cérémonial » gratifiant, s'il est accompagné de gratifications !

Des audits périodiques de reconduction du label garantiront que l'effort des acteurs ne se relâche pas dans le temps. Car deux effets contradictoires sont observés au niveau des équipes après l'étape 12 :

– un effet négatif, mais naturel, une certaine « décompression » fait suite à la pression exercée pendant la durée du programme TPM. La dynamique instaurée par le fait du travail d'équipe peut faiblir, mais sans remettre en cause les acquis ;

– un effet positif, car irréversible, l'expérience vécue et partagée de l'enrichissement du travail, de la prise d'initiative, de l'autonomie favorisée, de la solidarité de l'équipe fait qu'*aucun acteur ne désire revenir en arrière*.

Rappelons que le 0 mépris est la plus sûre condition de réussite et surtout de pérennité d'un programme TPM.

10.2.6 Programme TPM simplifié : l'automaintenance

Nous avons développé l'étape 8 du programme TPM séparément, car c'est la plus caractéristique de la TPM par sa double approche technique et humaine. De plus, elle peut être développée comme « projet autonome ». Pour le projet autonome « automaintenance » destiné aux PME, voir le paragraphe 10.5 de cet ouvrage et (LAV 96).

Remarque

Y. Lavina propose judicieusement de faire précéder le « top départ » du projet « automaintenance » d'un audit spécifique destiné à tester la prédisposition de l'entreprise : en particulier pour ce qui concerne le mode de management, donc les niveaux de motivation, de technicité et d'intégration du personnel concerné. Faute de l'existence de ces prérequis, l'expérience a de fortes chances d'échouer : il vaut mieux alors la différer.

❑ **Tâches de l'automaintenance**

Il est évident que le niveau d'automaintenance visé sera conditionné par la technicité initiale moyenne de l'équipe affectée au chantier, sachant que le métier de départ des opérateurs était généralement limité à la seule conduite des installations et qu'il était exercé dans un cadre de management hiérarchique.

L'automaintenance implique que les opérateurs de conduite d'un équipement, constitués en équipes polyvalentes et autonomes, prennent progressivement à leur compte :

– les 5 S liés à l'environnement de l'équipement (nettoyage, rangement, etc.), la base de l'automaintenance, développée au paragraphe 7.5.3 ;
– la détection des anomalies et l'observation des symptômes ;
– l'alerte (appel maintenance avec participation au diagnostic) ou la prise d'initiative de la correction des anomalies (pertes de production par microarrêts) ;
– la maintenance de premier niveau (microdéfaillances et petits dépannages, réglages simples, surveillance active, inspections, lubrification, resserrages, etc.) ;
– les tâches simples de maintenance systématique (remplacement de filtres, de courroie, etc.) ;
– la saisie des informations inhérentes à ces tâches.

Des fiches de « consignes permanentes » de poste, décrites au paragraphe 6.5.2, précisent les opérations à effectuer et leur traçabilité. La réalisation de ces tâches « enrichies » est rendue progressivement (2 à 3 ans) possible par l'apprentissage de la solidarité d'équipe, par la formation reçue, par l'assistance de la maintenance et par les moyens fournis. À la méfiance succède la confiance, à l'obéissance succède l'initiative, à la seule correction des anomalies succède la recherche de leur prévention.

❑ **Responsabilisation de l'opérateur**

☐ **Analyse des conditions de l'automaintenance : le rôle de l'opérateur**

Schématisons la problématique de la prise en responsabilité d'une opération par un opérateur.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

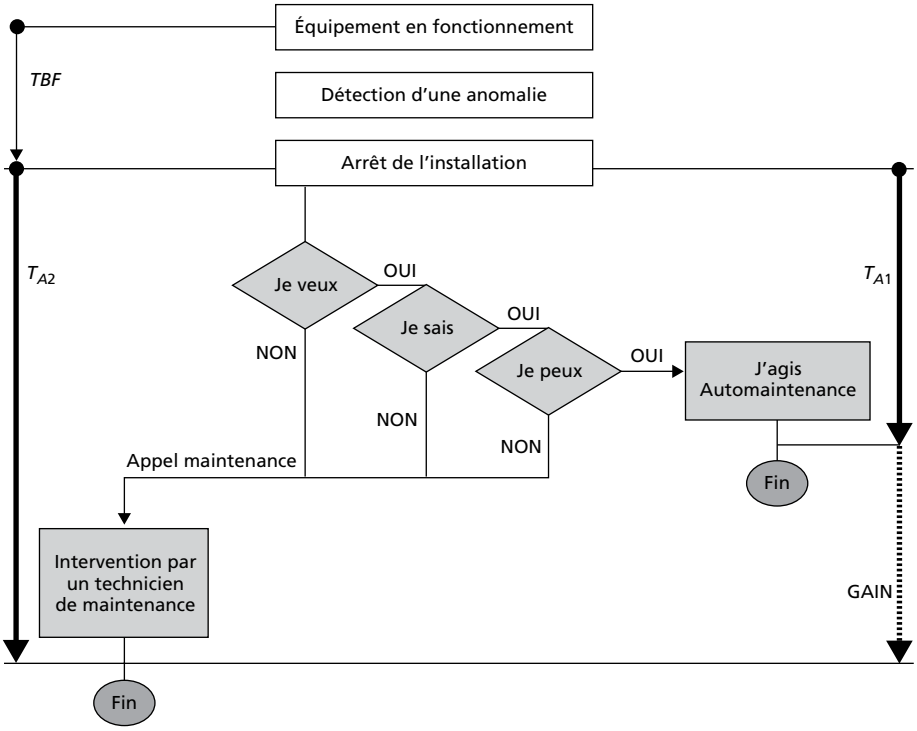


Figure 10.11 – Analyse de la prise en charge par l'opérateur

La figure 10.11 met en évidence le gain de temps, donc de productivité, associé à l'automaintenance. Ce gain élémentaire est, par nature des microarrêts, multiplié un grand nombre de fois chaque journée de travail : c'est un gisement de productivité important. La figure 10.11 analyse également les étapes de la prise en charge d'une opération, constitutive de l'automaintenance. Les questions successives « *je veux, je sais, je peux* » ne consomment pas de temps, mais elles caractérisent le comportement de l'opérateur.

« Je veux » pose le problème incontournable de la motivation

Nous ne ferons jamais de l'automaintenance contre la volonté des salariés, mais avec. C'est ainsi que certains salariés peuvent se « marginaliser » a priori, au début d'un plan TPM, jusqu'à ce qu'ils manifestent le désir d'intégrer une équipe ou de réintégrer leur équipe. Seule une responsabilisation acceptée, car encouragée, aidée et reconnue, peut entraîner le « je veux ». Lorsque le climat social n'est pas favorable, il ne faut pas se lancer dans la TPM !

« Je sais » pose le problème de la compétence et de ses limites

La compétence n'est jamais acquise, mais apprise. L'automaintenance suppose un minimum de technicité comme prérequis, à partir de laquelle un plan de formation adapté, accompagné de l'action-formation de l'expérience du terrain (étapes 7

et 8) et accompagné de l'assistance permanente par les techniciens de maintenance, doit progressivement amener chaque opérateur au niveau requis pour atteindre l'autonomie.

Remarques

Le technicien de maintenance est appelé à jouer un rôle de « moniteur », pour expliquer le « comment » et surtout le « pourquoi » des actions préconisées.
Il est également important que l'opérateur apprenne ses limites, le « je ne sais pas ». Les bornes de l'automaintenance doivent être marquées, même si elles sont appelées à s'élargir progressivement.
Classiquement, passé un certain délai d'essai de rétablissement de la production en autonomie (huit minutes, par exemple), le recours à la maintenance est imposé.

« *Je peux* » *pose le problème de l'organisation et des moyens*

L'organisation interne de l'équipe doit être à même de solliciter un opérateur disponible. Mais il est bien évident que des cas de surcharge peuvent se produire, où aucun agent compétent n'est disponible : c'est alors le recours à la maintenance.

Cette question pose également le problème de la logistique du chantier : si les moyens nécessaires sont absents, c'est alors l'occasion d'une mise à niveau logistique, avec la participation des opérateurs pour déterminer quels sont leurs besoins.

☐ Pour une nouvelle responsabilité

Si la taylorisation s'est révélée efficace sur un plan économique il y a quelques décades, elle a minimisé les capacités et les aspirations des travailleurs. Toutes les expériences contemporaines montrent que les opérateurs sont capables de réfléchir, de proposer des solutions et de contrôler leur propre travail dès lors :

– qu'ils sont impliqués dans la réalisation de leur tâche dans une solidarité d'équipe ;

– que la maîtrise s'oriente vers une attitude de soutien et de conseil ;

– qu'ils ne sont plus soumis à un contrôle systématique.

« Personne ne sait mieux que moi si j'ai réussi mon opération (ou pas fait, ou mal fait, ou de façon douteuse). » L'idée maîtresse de la responsabilisation repose sur cette faculté donnée à tous d'autocontrôle à encourager par une « déculpabilisation » propre au système de management participatif.

❑ Enjeux liés à l'automaintenance : gains en temps et en coûts

Sur la figure 10.12, les vecteurs T_{A1} et T_{A2} représentent respectivement les durées d'indisponibilité dans le cas de l'automaintenance et dans le cas de l'« appel maintenance ».

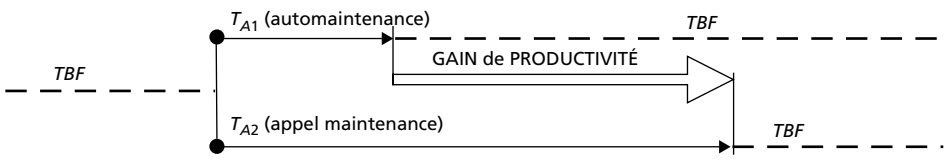


Figure 10.12 – Mise en évidence du gisement de gain de productivité

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Remarquons que le gain réel $T_{A2} - T_{A1}$ dû à l'automaintenance est supérieur à celui dessiné sur la figure, car :

– le recours à la maintenance obéit parfois à une procédure administrative qui consomme du temps. De plus, le dépanneur n'est pas toujours à côté, ni disponible. Il est courant qu'une action d'automaintenance de 5 minutes demande demi-heure en cas d'intervention extérieure ;

– le dépanneur ne connaît pas les symptômes ayant permis la détection d'un problème. Son investigation est alors compliquée, même s'il bénéficie des informations d'un opérateur ;

– les actions d'automaintenance sont généralement très répétitives : on les nomme « microdéfaillances » par opposition aux pannes durables, beaucoup plus rares. Le gain sur une action est alors multiplié par *N*, nombre de microdéfaillances : il devient alors un gain très appréciable sur une durée longue.

Au gain en temps correspond un gain en coûts. Sachant que chaque durée de non-disponibilité T_A est proportionnelle aux coûts d'indisponibilité, elle va donc générer des pertes financières fonction de la criticité économique de l'équipement.

L'automaintenance génère bien d'autres gains, les moindres n'étant pas ceux issus du 5 S machine. Le *TRS* intègre et mesure tous ces gains. Cet indicateur synthétique met ainsi en évidence l'efficacité de la TPM comme outil d'amélioration de compétitivité de l'entreprise. À cet enjeu économique majeur correspond bien sûr l'enjeu social qui fait l'originalité et la force de la TPM et dont nous avons analysé les multiples facettes.

10.3 MBF : maintenance basée sur la fiabilité

10.3.1 Origines de l'organisation MBF

❑ **La RCM (*Reliability Centered Maintenance*) pour l'aéronautique**

La RCM a été introduite en aéronautique vers 1960 aux États-Unis pour déterminer les programmes de maintenance. La publication du document MSG (*Maintenance Steering Group*) a fixé les bases de la méthode de développement d'un programme de maintenance recevable à la fois pour les constructeurs d'avions, pour les autorités de l'aviation civile et pour les compagnies. Il faut souligner que la certification de navigabilité des appareils commerciaux est conditionnée à la mise en œuvre de la maintenance MSG (programme MSG 3 pour l'Airbus A 320 et les Boeing 757 et 767).

L'évolution des versions successives des MSG a traduit la régression de la maintenance planifiée, le développement des actions conditionnelles, puis l'optimisation économique dans le respect de l'objectif prioritaire qu'est la sécurité.

❑ **L'OMF (optimisation de la maintenance par la fiabilité) pour le nucléaire français**

C'est en 1984 que la méthode de maintenance RCM a été transposée au nucléaire américain, puis importée par EDF au nucléaire français sous le nom « projet OMF ».

L'OMF peut se définir comme une politique de maintenance ayant pour objet « de définir un programme de maintenance préventive afin de contribuer à maintenir, voire à améliorer la fiabilité des fonctions des systèmes qui sont importantes pour la sûreté et la disponibilité des tranches nucléaires » (d'après G. Zwingelstein, EDF). En 1991, EDF a pris la décision de généraliser l'application de l'OMF à toutes les tranches 900 MW, puis aux 1 300 MW à partir de 1995.

Les objectifs de l'OMF sont les suivants :

– le maintien, voire l'amélioration de la sûreté nucléaire ;
– la maîtrise des coûts et l'optimisation économique de la maintenance, suivant le principe « exercer l'effort au bon endroit » ;
– la mise en œuvre d'une méthode structurée et rationnelle, par analyse de chaque mode de défaillance fonctionnelle ;
– l'utilisation du retour d'expérience pour réajuster les programmes de maintenance et leur pertinence.

❑ La MBF pour l'industrie

L'idée d'adapter la RCM à l'industrie a été développée en France par une collaboration de l'ADEPA (Association pour le développement de la productique et de l'automatisation) et de l'université de Nancy (ESSTIN). L'ouvrage RIC 96, *Maintenance basée sur la fiabilité*, est le fruit de cette collaboration.

Plus pragmatique que la TPM, la démarche MBF repose sur l'analyse technique des équipements, donc sur *une forte implication des techniciens de maintenance* et de l'encadrement sectoriel, le résultat « abouti » étant proche de celui obtenu par la démarche TPM : une redistribution des responsabilités dans une nouvelle organisation.

La démarche RCM simplifiée se prête à une structuration de la maintenance à partir de services « entretien » comme l'on en trouve encore dans certaines PME dont la gestion de la production était la seule préoccupation, mais dont la situation concurrentielle impose une meilleure maîtrise de la qualité, des coûts et des délais, et donc une meilleure maîtrise de l'outil de production. La maintenance est pour ces entreprises un vecteur de productivité pas ou mal exploité, d'où l'utilité de disposer d'un outil d'organisation simple faisant rapidement apparaître des résultats économiques.

10.3.2 Définition, objectifs et principes de la MBF

L'objectif de la MBF est de proposer aux entreprises une méthode structurée permettant *d'établir un plan de maintenance « sélectif »* à partir de la criticité des équipements, puis de leurs défaillances identifiées. Cela à partir d'une démarche « participative ».

❑ Définitions de la MBF

Quelques définitions de la MBF, tirées de la littérature récente, donneront l'idée générale de la méthode :

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– « La RCM est une stratégie de maintenance globale d'un système technologique utilisant une méthode d'analyse structurée permettant d'assurer la fiabilité inhérente à ce système » (J. Harris et B. Moss).
– « La MBF est une méthode destinée à établir un programme de maintenance préventive permettant d'améliorer progressivement le niveau de disponibilité des équipements critiques » (collectif).
– « La MBF est une méthode reposant essentiellement sur la connaissance précise du comportement fonctionnel et dysfonctionnel des systèmes » (Ligeron).

❑ Objectifs de la MBF

L'objectif principal est clair : améliorer la disponibilité (plus importante que la seule fiabilité dans l'industrie) des équipements sélectionnés comme critiques par leur influence sur la sécurité, sur la qualité et par leur impact sur les flux de production.

Améliorer la disponibilité implique la réduction des défaillances techniques par la mise en place d'un plan préventif « allant à l'essentiel », mais aussi la réduction des durées de pertes de production par une nouvelle répartition des tâches entre production et maintenance.

D'autres objectifs sont recherchés :

– la maîtrise des coûts par l'optimisation du plan de maintenance préventive, en faisant porter l'effort de prévention « au bon endroit au bon moment », donc par élimination de tâches préventives constatées improductives ;
– la mise en œuvre d'une démarche structurée, par analyse systématique de chaque mode de défaillance qui permet de justifier les décisions prises ;
– la mise en œuvre d'une démarche participative au niveau des groupes de travail MBF ou au niveau des tâches réparties entre production et maintenance ;
– la rapidité des résultats associée à une faible perturbation de l'organisation en place, par opposition à la TPM qui est une démarche globale de management à objectifs sur le long terme.

En fait, il faut relativiser l'ambition de la MBF : sélective par nature, elle permet de cibler l'effort de prévention et d'organisation autour de points sensibles pour la production. Mais ce faisant, elle jette les bases d'une organisation promouvant la fonction « méthodes » indispensable à la réalisation des analyses de défaillances et à l'exploitation des retours d'expérience. Ainsi, elle peut servir de base de départ, puis de pilier à un programme TPM ultérieur, en particulier dans sa phase 9 : « établissement d'un plan de maintenance programmée ».

❑ Les trois principes de la MBF

☐ Le principe d'auto-limitation

Le principe d'auto-limitation ou de sélection systématique des criticités s'applique à des niveaux successifs : les équipements, les sous-ensembles « fragiles », les défaillances, leurs causes puis les tâches de maintenance. D'où l'utilisation des matrices et de critères de sélectivité adaptés à l'entreprise et à l'équipement ou l'application de la méthode MERIDE.

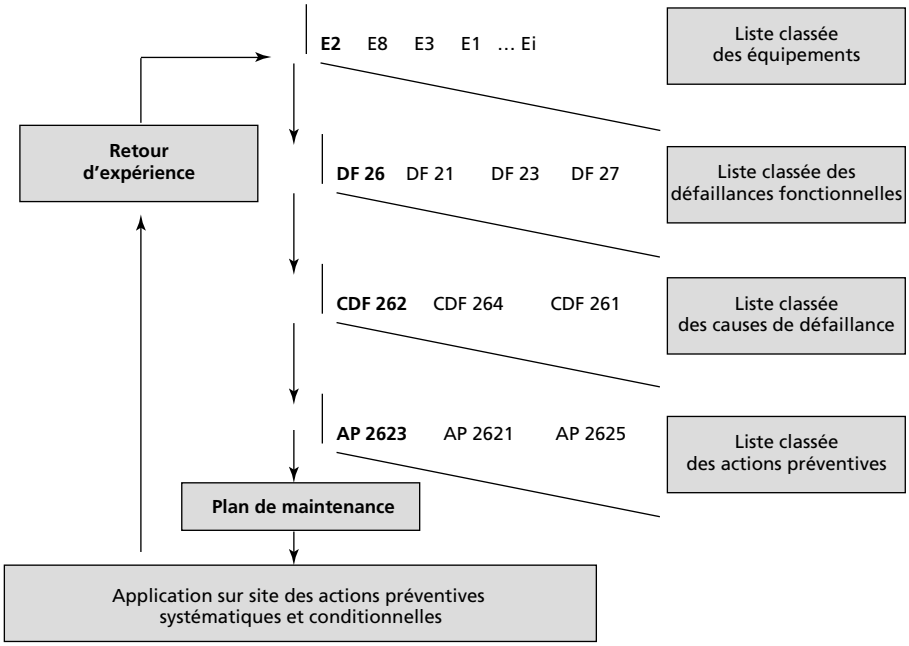


Figure 10.13 – Illustration du principe de sélectivité

□ Le principe de subordination

Principe de subordination des tâches de maintenance préventives à la connaissance « fiabiliste » des défaillances et de leurs causes. On ne peut bien anticiper que ce que l'on a appris à bien connaître, ce que Ligeron a exprimé sous la forme : « la MBF est une méthode reposant essentiellement sur la connaissance précise du comportement fonctionnel et dysfonctionnel des systèmes ». D'où l'utilisation des expertises de défaillances et de retours d'expérience en nombre suffisant pour être significatif. Ce principe de subordination justifie le nom choisi : la maintenance basée sur la fiabilité.

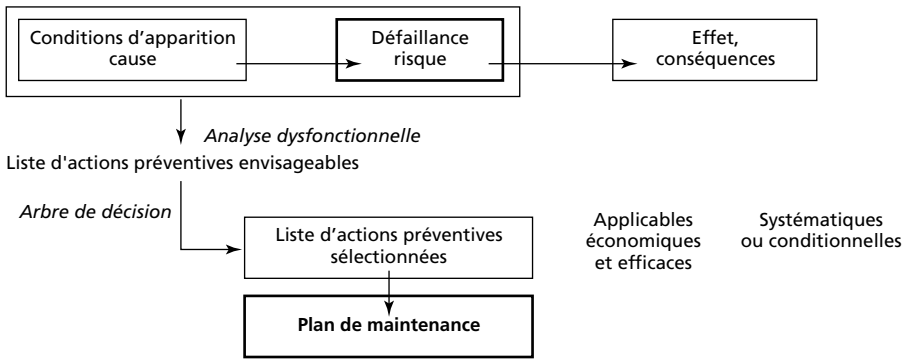


Figure 10.14 – Illustration du principe de subordination

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Exemple d'application par suppression de tâche inutile : il est illusoire de vouloir appliquer une maintenance systématique à un composant soumis à des défaillances aléatoires ! À quelle période faut-il changer systématiquement ses pneumatiques pour ne plus crever ? Cibler une action préventive d'un risque identifié suppose donc la connaissance des causes, des conditions d'émergence et des caractéristiques de ce risque.

□ Le principe de participation des acteurs concernés

La méthode repose sur la constitution de groupes MBF mixtes impliquant aussi bien les agents de maintenance que ceux de production et de la qualité. L'adhésion de tous est nécessaire à la démarche qui est donc de type participative. En particulier, les estimations des « criticités relatives » sur lesquelles repose la hiérarchisation des problèmes impliquent les regards et les expériences croisées des acteurs. De même la sélection des seules actions « efficaces et applicables » implique le regard des exploitants qui mettront en œuvre ces actions.

La mise en place de ces groupes est volontairement limitée dans le temps, une fois les actions préventives définies et validées. Par contre, le « retour d'expérience » nécessaire à l'optimisation progressive du plan de maintenance sera utilisé par une structure permanente, le bureau des méthodes de maintenance.

Un problème apparaît pour certaines PME voulant aborder une démarche MBF : le manque de ressources internes disponibles pour assurer la modernisation de la fonction maintenance. Une aide extérieure temporaire est alors indispensable au démarrage de l'organisation MBF (formation d'un groupe MBF « pilote »).

10.3.3 Les cinq étapes de la démarche MBF

❑ Diagramme des cinq étapes

Les étapes 0, 1, 2 et 3 forment la démarche initiale de la MBF, alors que les étapes 1, 2, 3 et 4 représentent une itération permanente s'inscrivant dans une recherche d'optimisation et d'amélioration permanente (figure 10.15).

❑ Étape 0 : formation d'un groupe « pilote »

Bien entendu et de façon identique à la TPM, une « étape initiale » est indispensable.

Elle concerne :

– l'engagement de la Direction, la déclaration de ses objectifs prioritaires et la sensibilisation de toute l'entreprise au projet ;

– la formation d'un groupe « pilote » MBF avec un chef de projet et des responsables production, maintenance et qualité. C'est la « cheville ouvrière » du projet ;

– la formation des groupes « équipement » non permanents, avec le choix des acteurs impliqués parmi ceux qui connaissent le mieux l'équipement. Ce groupe recueille les informations de terrain et analyse les défaillances à prévenir en une semaine environ.

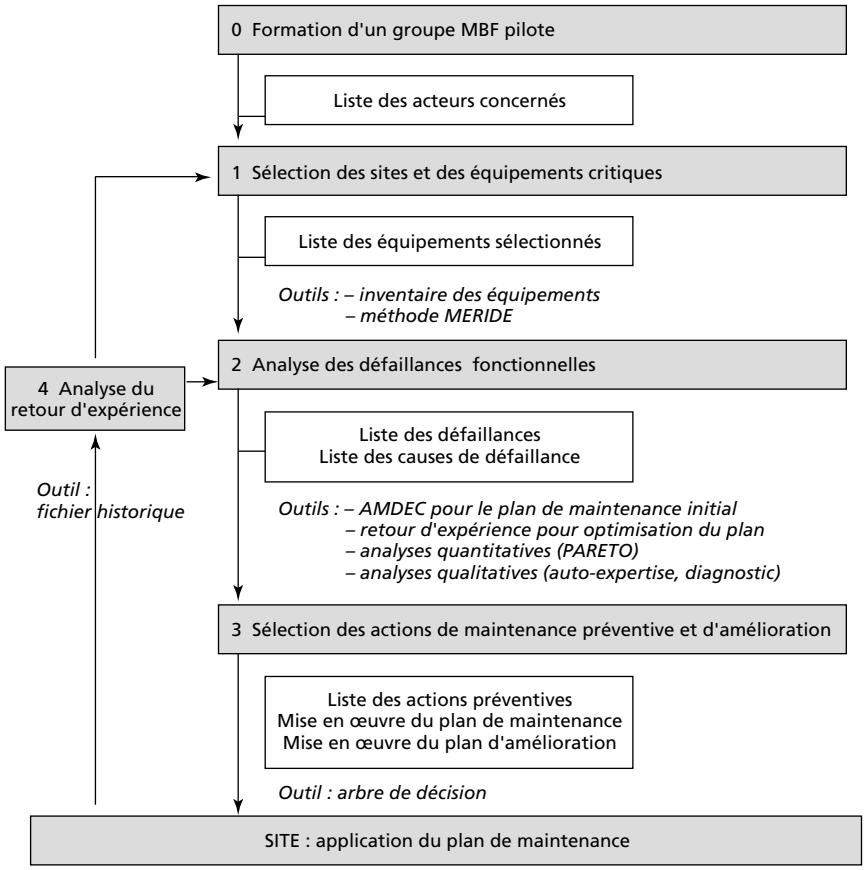


Figure 10.15 – Les cinq étapes de la MBF et les outils à mettre en œuvre

❑ Étape 1 : sélection des équipements critiques

Si ce n'est déjà fait, le groupe pilote MBF devra d'abord effectuer un découpage géographique de l'entreprise en sites, ateliers ou lignes de production, puis un découpage fonctionnel en équipements, groupes fonctionnels et sous-ensembles (les modules). Cela dans le but d'identifier les impacts d'une défaillance-équipement sur la sécurité, sur le flux de production et sur la qualité.

☐ Au niveau des équipements

Les trois critères retenus pour sélectionner les équipements à fiabiliser sont la sécurité S, la production caractérisée par la disponibilité D et la qualité Q. La collecte des informations repose sur l'exploitation des éventuels historiques existants, enrichie de l'expérience de chaque participant. Elle va permettre l'estimation de la criticité a priori de chaque équipement recensé. L'estimation mesure d'abord l'impact sur la sécurité S, puis une matrice de criticité permet de prendre en compte l'impact sur D et sur Q.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Tableau 10.4 – Exemple de matrice de criticité

Impact sur la disponibilité	Impact sur la qualité		
	Négligeable	Acceptable	Inacceptable
Négligeable	1	2	3
Acceptable	2	4 (à contrôler)	6
Inacceptable	3	6	9

– *Impact sur la sécurité* : à partir des directives réglementaires seront en plus prises en compte les expériences malheureuses passées et l'évaluation sécuritaire du risque. Toutes les machines ainsi réputées dangereuses seront sélectionnées.
– *Impact sur la qualité :* le groupe MBF évaluera le pourcentage de pertes dû à l'équipement et l'influence de l'équipement sur la qualité finale du produit.
– *Impact sur la disponibilité :* le groupe prendra en compte la fréquence des pannes ou le taux de défaillance λ, l'influence des arrêts, leurs effets inducteurs sur la production amont et aval, l'existence ou non d'une possibilité de secours (redondance).

Les valeurs de critères seront à moduler par le groupe en fonction des objectifs de l'entreprise : quelles sont les priorités de la Direction ? Le groupe MBF établit ainsi la liste initiale hiérarchisée des équipements pour lesquels un plan de maintenance préventive sera élaboré à partir des défaillances à éviter.

☐ **Au niveau des modules (sous-ensembles fonctionnels)**

Dans le principe de la démarche, à chaque étape, seuls les éléments identifiés comme critiques sont pris en compte. De ce fait, il est utile de rechercher, pour un équipement sélectionné, quels sont ses sous-ensembles « critiques ». De plus, l'AMDEC s'appuyant sur l'identification des « pertes de fonction », il est utile de relier chaque module aux fonctions auxquelles il participe par la réalisation d'une analyse fonctionnelle. La figure 10.16 donne un exemple de découpage matriciel (d'après RIC 96) facilitant cette recherche.

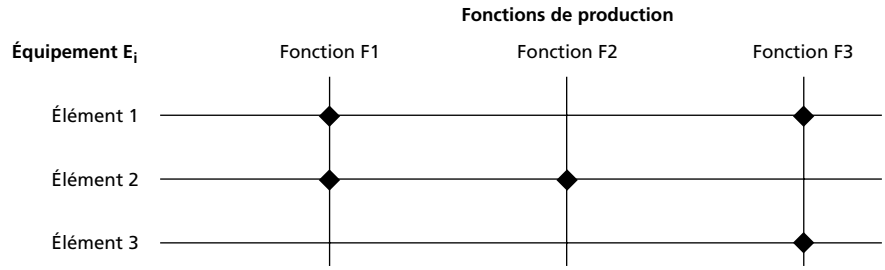


Figure 10.16 – Découpage matriciel d'un équipement

Des éléments d'équipements dont l'éventuelle défaillance est sans effet sur aucune des fonctions de production sont ainsi éliminés de la suite de l'étude, et des AMDEC en particulier.

❑ Étape 2 : analyse des défaillances fonctionnelles

Le groupe équipement commence par effectuer deux analyses fonctionnelles :

– une *analyse fonctionnelle externe*, chaque équipement étant une « boîte noire » qui permet d'identifier les fonctions externes ainsi que les interfaces avec son environnement. La méthode des « interacteurs » (norme X 50-153) paraît bien adaptée à cet inventaire de fonctions externes ;

– une *analyse fonctionnelle interne* associant à chaque fonction identifiée les modes de défaillance qui sont susceptibles de causer la perte ou la dégradation de la fonction. Le mode de défaillance s'exprime par la manière dont un module ne peut plus remplir sa fonction.

L'outil de base pour la réalisation par le groupe « MBF équipement » de ces analyses est l'AMDEC classique (voir § 4.5.3). La figure 10.17 propose un exemple de feuille d'analyse simplifiée.

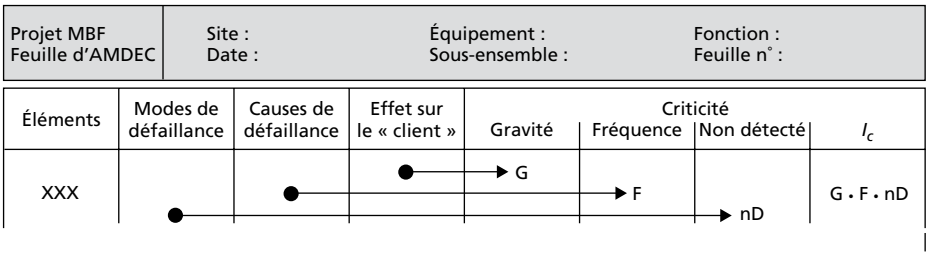


Figure 10.17 – Exemple de feuille d'AMDEC simplifiée de sélection des défaillances

La sélection des défaillances à prévenir se fait à partir de l'indice de criticité I_c fonction des critères retenus, l'indice de gravité G étant souvent choisi prédominant.

En effet l'indice G se détermine à partir de l'« effet sur le client » par l'impact prévisible de la défaillance envisagée :

– sur la sécurité S (estimation du risque corporel) ;

– sur la fiabilité ou la disponibilité D (estimation des durées d'arrêt de fonctionnement) ;

– sur la maintenabilité M (estimation de la MTTR) ;

– sur la qualité Q (estimation du taux de défaut).

Chaque critère est par exemple évalué par une note de 1 (effet négligeable) à 5 (effet majeur). L'étape 2 se termine par la liste hiérarchisée de toutes les défaillances que le groupe a choisi de prévenir. Cette liste est volontairement limitée aux défaillances les plus critiques a priori, associées à leur siège (l'élément maintenable), à leur mode et à leurs causes.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

❑ Étape 3 : sélection des actions préventives

□ Utilisation de logigramme de décision

Il reste à associer à chaque défaillance sélectionnée une ou plusieurs actions préventives, voire d'amélioration lorsque l'action sur la cause élimine la probabilité de défaillance (figure 10.14).

Pour aider à cette recherche, l'utilisation d'un « logigramme de décision » permet de systématiser la recherche de la simplicité (économique et facile) alliée à l'efficacité. Le modèle de base est le MSG3 dédié à la maintenance aéronautique, dont il est possible de garder l'esprit tout en l'allégeant pour le rendre utilisable en PME.

Nous donnons figures 1.9 et 10.18 deux exemples de structure de logigramme MBF utilisé à partir d'une défaillance sélectionnée.

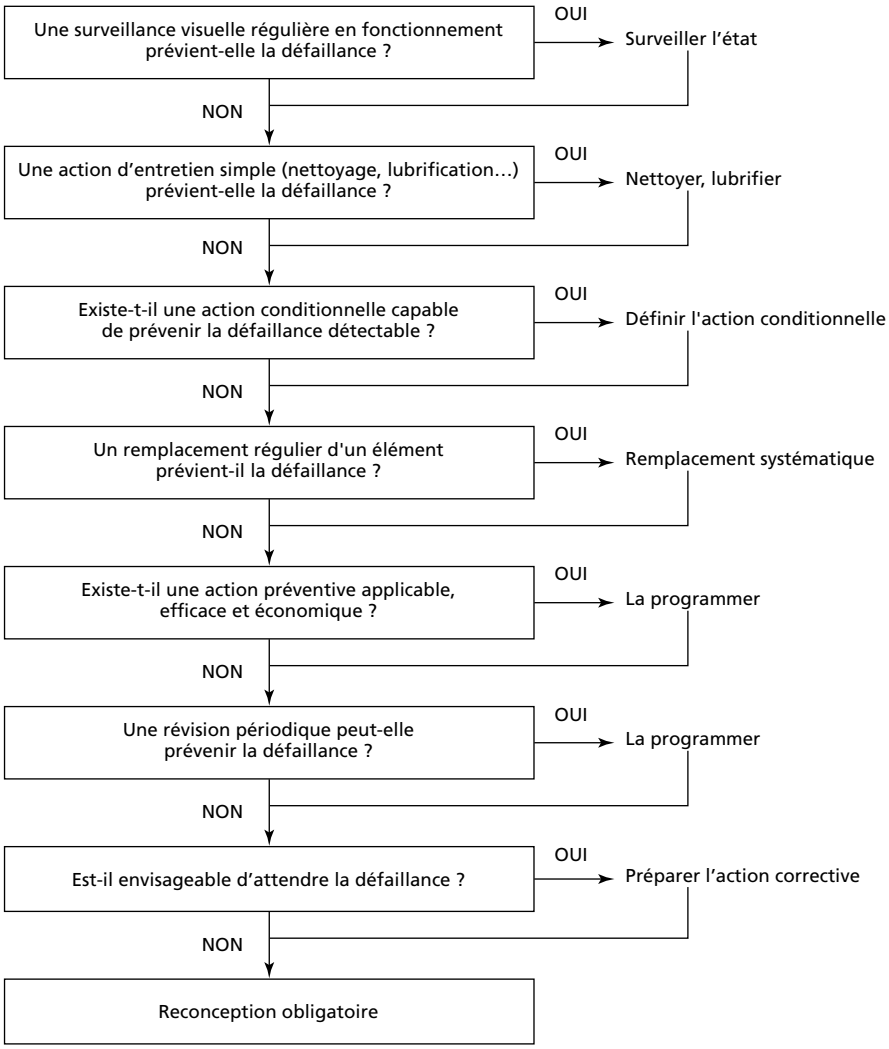


Figure 10.18 – Logigramme de choix d'actions

☐ Les différentes actions envisageables

– *Reconception* : si le groupe ne peut trouver aucune action préventive à une défaillance critique, alors la remise en cause de la conception s'avère obligatoire. Une liste des éléments à reconcevoir est alors établie.
– *Plan d'amélioration* : l'application du principe de subordination amène naturellement à agir sur les causes de micro-défaillances répétitives, et donc à améliorer l'équipement : un plan d'amélioration permanente est alors possible.
– *Plan de maintenance préventive* : pour les défaillances graves et détectables, la prise en charge en maintenance conditionnelle s'impose ; pour les autres défaillances, il reste à créer le « plan de maintenance systématique » de l'équipement qui sera finalisé par un « échéancier » des opérations.

Critères S	D	M	Q	nD	Élément sélectionné	Action préventive préconisée	Période d'intervention	Qualification de l'intervenant
3	5	4	3	2	XXXXX	YYYYYYYYYY	3 semaines	opérateur

Figure 10.19 – Exemple de feuille de définition de tâche préventive

Les fiches d'analyse des tâches préventives permettent alors d'établir la « liste des actions préventives » sélectionnées.

☐ Élaboration du plan de maintenance systématique

Le sujet a été traité au chapitre 6 (§ 6.5.2), en particulier pour ce qui concerne la nature des tâches envisageables. Résumons les éléments constitutifs d'un plan de préventif systématique :

– la nature de l'opération, définie par une procédure d'intervention adaptée au niveau de l'intervenant ;
– la période d'intervention, qui sera optimisée ultérieurement à partir du retour d'expérience ;
– la qualification, le nombre d'intervenants et les temps d'intervention prévus ;
– la répartition des tâches entre les opérateurs (les opérations simples) et les techniciens de maintenance ;
– les durées d'intervention et d'indisponibilité de l'équipement prévues ;
– la nature et le nombre de rechanges ;
– la nature des outillages et des moyens nécessaires à l'intervention préventive ;
– le gisement des documents techniques utiles.

Pour achever cette étape 3 du projet MBF, il reste à réaliser l'échéancier provisoire, qui sera progressivement optimisé, lors de l'étape 4.

❑ Étape 4 : analyse du retour d'expérience

Le retour d'expérience se fera par les méthodes d'analyses de défaillances quantitatives, qualitatives et fiabilistes habituelles, sous réserve que leur nombre N soit significatif.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ **Un plan de maintenance préventive dynamique et évolutif**

Le plan de maintenance initial, reposant sur les informations disponibles au moment de l'analyse, va être confronté à la réalité du terrain. Ce plan va donc devenir un plan « dynamique » enrichi par l'expérience de plusieurs façons :

– par allégement (suppression de tâches, simplification de procédures, espacement de périodes…) ;
– par renforcement (ajout de tâches, raccourcissement des périodes…) ;
– par transfert d'affectation vers les opérateurs ;
– par transfert de tâche préventive en externalisation ;
– par transfert de tâche préventive systématique vers la maintenance conditionnelle ;
– par optimisation technique (connaissance de la MTBF, des lois comportementales…) ;
– par optimisation économique (l'optimisation économique est l'occasion d'affiner le plan par estimation du coût d'une action préventive par rapport au coût supposé de la défaillance évitée).

☐ **Qui va optimiser le plan de maintenance ?**

L'enrichissement du plan est de la responsabilité du bureau des méthodes de maintenance qui doit s'appuyer pour ce faire sur les compétences des acteurs du « groupe MBF équipement ». L'analyse du retour d'expérience se fait à partir des fiches d'intervention et elle est accompagnée de la mise en place d'indicateurs de performance.

☐ **Quels sont les cas possibles ?**

– Des défaillances « attendues » (figurant sur la liste des défaillances sélectionnées) vont être vécues, malgré le plan de préventif : c'est l'occasion de comprendre le pourquoi et de remettre en cause soit la nature de l'action préventive avérée inefficace, soit sa périodicité, soit les moyens mis en œuvre.
– Des défaillances « inattendues » vont être vécues : c'est l'occasion de les négliger si elles sont de caractère accidentel, peu grave et peu probable, ou l'occasion de les intégrer si elles correspondent à une « omission » de l'analyse initiale.
– Des défaillances « attendues » n'arrivent jamais : le préventif est donc efficace, mais il peut être non minimum, et donc simplifiable.

❑ **Effets induits par la démarche MBF**

Les expériences industrielles de MBF (projet européen CRAFT, portant sur 15 PME en fonderie) mettent en évidence les aspects suivants.

– La méthode MBF étant par nature « auto-limitative », le volume initial de préventif est réduit à l'essentiel, ce qui donne des effets rapides quant aux performances et rassure les acteurs.
– Les actions préventives à poste menées par les opérateurs permettent un gain important et rapide de disponibilité opérationnelle.
– Les actions de nettoyage de poste ont en particulier un effet positif.

– La diminution de la « charge corrective », corollaire naturel d'un préventif efficace, permet de dégager des ressources de maintenance vers des actions continues d'amélioration, vers des actions « en amont » et vers plus d'efficacité au niveau des « méthodes de maintenance ».
– La démarche MBF étant participative, l'implication des acteurs dans un travail d'équipe a un effet mobilisateur qui va bien au-delà des résultats économiques chiffrables.
– Le décloisonnement « qualité/production/maintenance » est assuré par la formation des groupes MBF mixtes. Cette habitude de travailler ensemble en convergence vers un objectif partagé (la satisfaction du client par-delà l'amélioration de la disponibilité et de la qualité) est un des enjeux majeurs des entreprises.

L'amélioration du niveau de fiabilité doit se faire par une économie progressive de moyens, tel est l'objectif initial de la MBF : *améliorer les performances, mais en n'agissant que là où c'est efficace…*

Remarque destinée aux enseignants et formateurs

Si la MBF se révèle être une méthode opérationnelle efficace pour les PME, mon expérience de formateur et de professeur m'ont convaincu qu'elle est également d'une *grande richesse pédagogique* : il est possible d'inculquer dans une progression logique toutes les connaissances utiles de gestion de la maintenance prévues en BTS et en DUT en suivant les cinq étapes de la méthode MBF !

10.4 Intégrer la maintenance à la conception : la performance pour demain

10.4.1 Intégrer la maintenance à la conception : les enjeux

❑ Notions utiles et situation du problème

□ Le concept *LCC*

Le concept du *LCC* (*life cycle cost*) est à la base de ce chapitre : 90 % des dépenses opérationnelles sont prédéterminées avant la mise en route (voir figure 9.13). Rappelons la définition du « coût du cycle de vie » d'après le projet CEN : « ensemble des coûts engendrés pendant le cycle de vie d'un bien ». Ce coût de possession comprend pour l'utilisateur « les coûts relatifs à l'acquisition, à l'exploitation, à la maintenance et à l'élimination du bien ».

□ Autres concepts utiles

Tout produit n'est qu'un support de service, et seul le service rendu peut satisfaire le besoin de l'utilisateur.

Faire bien du premier coup implique de mettre de l'intelligence en amont de la mise en service.

Rappel de la définition de la qualité d'après l'ISO 8402 : « ensemble des caractéristiques d'une entité (un équipement, ici) qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire les besoins exprimés et implicites (de l'utilisateur) ».

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

☐ **Remarque**

« Vous ne gagnerez pas le Prix de l'arc de Triomphe avec un bourricot », même s'il est super entraîné, bien nourri voire dopé, et même s'il est cravaché par un as. Ce truisme fait sourire mes étudiants, avec un zeste d'ironie et de commisération !

Pourtant, cette évidence est souvent mal perçue par des responsables d'entreprise qui veulent gagner le grand prix de la compétitivité avec des équipements non capables, mal adaptés, non flexibles, intrinsèquement peu disponibles et sans soutien logistique suffisant. Face à ce type de matériel, la maintenance dépense bien de l'énergie et des coûts (investissement en GMAO par exemple) pour bien peu de résultats ! Car c'est plus en amont que se joue la performance.

Par analogie avec l'assurance qualité, je voudrai promouvoir dans ce paragraphe l'idée d'*assurance disponibilité*.

☐ **Rôle du service « ingénierie-travaux neufs »**

Pour l'entreprise utilisatrice d'un équipement de production, c'est en amont, par les « travaux neufs » que débute la prise de responsabilité de la maintenance. Le service « ingénierie-travaux neufs » est une structure en liaison directe avec le service « méthodes de maintenance », en exploitation du retour d'expérience. C'est aussi et surtout la structure d'interface avec le fournisseur. En liaison avec la maintenance et la production, il est maître d'œuvre :

– de l'exploitation pertinente du retour d'expérience capitalisé en interne ;
– de l'élaboration du cahier des charges (clauses de disponibilité, en particulier) ;
– de l'appel d'offre et du choix du matériel et du fournisseur, en partenariat avec la production ;
– de la définition des éléments du soutien logistique et de l'aptitude à la maintenance ;
– de l'intégration de ce matériel dans l'infrastructure existante ;
– de la formation des futurs utilisateurs (production et maintenance) éventuellement chez le fournisseur.

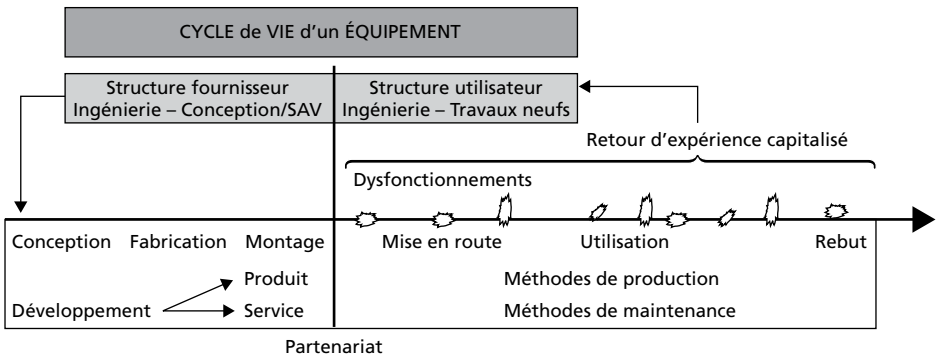


Figure 10.20 – Investir dans un service de qualité, pas seulement dans un équipement.

Les conditions du partenariat fournisseur/utilisateur ainsi que les conditions du retour d'expérience sont à imaginer et à formaliser : c'est un défi important déjà

abordé et résolu pour la fourniture des grands systèmes, mais souvent négligé entre PME pour la fourniture de biens d'équipement.

L'objet de ce chapitre est de montrer que la SdF (sûreté de fonctionnement), la construction de l'aptitude à la maintenance et le SLI (soutien logistique intégré) ne sont pas réservés aux seuls grands systèmes, mais doivent être simplifiés et adaptés à la satisfaction des besoins spécifiques des PME.

❑ Enjeu opérationnel

L'enjeu est clair : obtenir rapidement un bon *TRS* et, pour ce qui concerne la maintenance, une bonne disponibilité. Les deux leviers d'action pour obtenir l'assurance disponibilité sont la construction de la fiabilité et de la maintenabilité en fonction des besoins et de l'environnement propres à l'utilisateur.

Les deux méthodes pour y arriver sont l'intégration à la conception et au développement d'un équipement de sa sûreté de fonctionnement (SdF) et de son soutien logistique (SLI). Ces méthodes ont fait la preuve de leur efficacité dans les grands systèmes. Mais elles sont « lourdes » et « ésotériques » : il s'agit donc de combler le fossé entre les techniciens de maintenance (à bac + 2) et les fiabilistes (à bac + 14 !), entre l'AFIM et l'ISDF (Institut de la sûreté de fonctionnement), entre la maîtrise du comportement d'une ligne d'embouteillage et celui d'un Airbus.

La situation est étonnante, car les techniciens ayant fait la preuve de leur maîtrise d'un grand système complexe, doivent être capables de transférer une part de leur savoir-faire à des systèmes de production simples, mais dont les défaillances successives coûtent cher, à l'échelle d'une PME.

Pour la sûreté de fonctionnement, la mise en œuvre des outils « analyse fonctionnelle, AMDEC et arbres de défaillance » est envisageable sur des petits systèmes : nous les avons abordés au paragraphe 4.5, Analyses prévisionnelles de défaillances. Le soutien logistique intégré sera développé au paragraphe 10.4.3.

❑ Enjeu économique

La réflexion économique relative à l'investissement d'un équipement de production repose sur une inéquation simple qui est un pari sur l'avenir :

Surcoût consenti à l'acquisition < gain espéré sur le cycle d'exploitation

Le surcoût est constitué de l'intelligence mise au service de l'anticipation des problèmes *ab initio* par la mise en œuvre de l'assurance disponibilité (SdF + SLI) et par la génération d'un plan de maintenance. Ces surcoûts d'études seront complétés par des coûts liés aux exigences de fiabilité de composants sélectionnés comme « sensibles » et au déverminage des systèmes utilisés.

Le gain espéré repose sur une vision à long terme de tous les facteurs constitutifs du *LCC*. En particulier sur la mise au point rapide suivie de la diminution du nombre d'indisponibilités de l'équipement, donc sur la réduction des coûts directs et surtout indirects des défaillances. La figure 9.10 illustre bien ce « pari gagnant » qui, de plus, peut être « gagnant-gagnant » pour le fournisseur et pour l'exploitant.

Accepter de payer + 8 % de la valeur d'acquisition V_A d'un équipement pour économiser 8 % de son *LCC* est un excellent pari lorsque le $LCC > 10\ V_A$ au bout de

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

12 ans ! Encore faut-il que la PME ait une vision politique à long terme, puis les moyens d'investissement à court terme compatibles avec sa vision à long terme.

10.4.2 Que peut-on intégrer à la conception d'un équipement ?

Beaucoup plus de critères que les seules fonctions opérationnelles requises en terme de capacité de production ! La figure 10.21 montre la liste des critères qu'il est possible et souhaitable d'envisager dès la phase de conception d'un équipement.

Pour ce qui concerne la maintenance, il s'agit de concevoir l'aptitude de l'équipement à la maintenance interne pré-existante par le cahier des charges « maintenance », qui se rapportera :

– à l'évaluation des performances de fiabilité requises (taux de défaillance ou disponibilité contractuelle) ;

– à la définition des critères de maintenabilité (voir § 5.4.2) ;

– aux éléments utiles du soutien logistique ;

– aux facteurs de mise en sécurité et de conformité.

L'exploitation du retour d'expérience interne est à la base des données nécessaires à l'établissement du cahier des charges qui sera rédigé par le service « ingénierie-travaux neufs » en collaboration étroite avec les « méthodes-maintenance ».

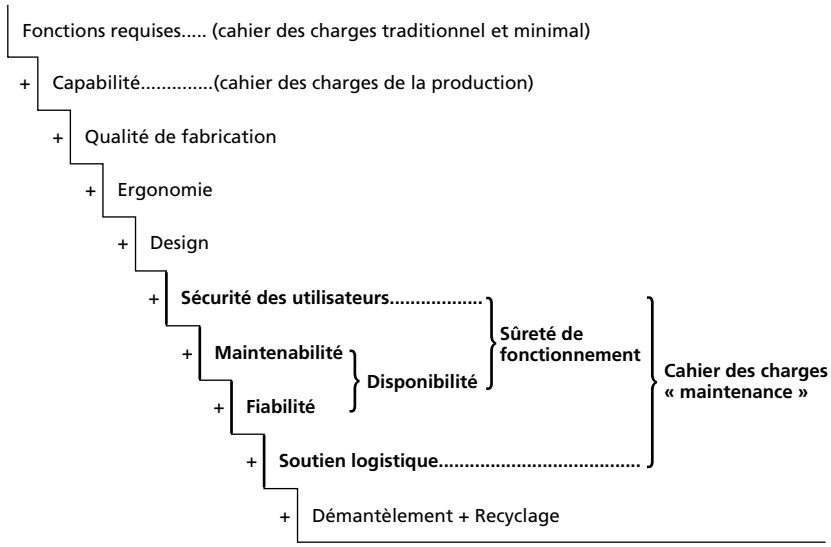


Figure 10.21 – Que peut-on intégrer à la conception d'un équipement ?

10.4.3 Développer simultanément l'équipement et son soutien logistique

L'idée de base est de développer simultanément, à toutes les étapes, la conception fonctionnelle du produit « équipement » et les éléments de soutien correspondant.

Exemple

Dessin de définition d'un palier lisse avec un ajustement fonctionnel H7f7.
– Aptitude à la maintenance : bague bronze interchangeable et graisseur.
– Éléments de soutien correspondants : mettre la bague bronze en pièce de rechange référencée, préciser la nature et la fréquence de la lubrification ponctuelle, effectuée à l'aide d'un graisseur standardisé et repéré sur la documentation.

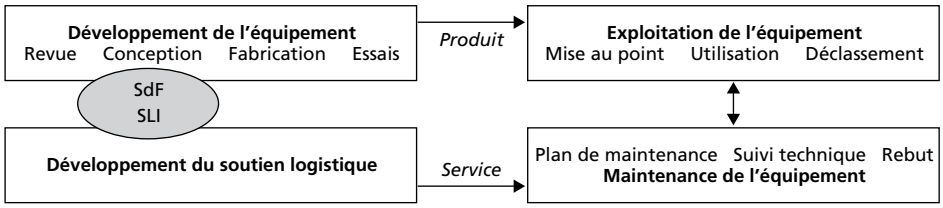


Figure 10.22 – Développements parallèles du produit technique et du service attendu

❑ Aspects SdF

La fiabilité et la maintenabilité se « construisent ». Attirons l'attention sur l'intérêt d'intégrer les critères de maintenabilité (élément de la SdF) le plus tôt possible dans la définition technique du produit. En particulier pour ce qui concerne l'accessibilité, la réparabilité, la testabilité (détection + localisation), la standardisation et le principe de modularité visant à la satisfaction des besoins de la maintenance et son économie. En effet, il n'est pratiquement plus possible en exploitation de modifier ces critères, que la maintenance « subit » alors à grands frais.

La pratique de l'AMDEC à l'issue de l'avant-projet est l'outil adapté pour la correction *ab initio* (c'est le niveau le moins coûteux) des problèmes potentiels par le dialogue concepteur/utilisateur. C'est également l'étape adaptée pour identifier les éléments de soutien à traiter.

❑ Aspects SLI

L'analyse du soutien logistique (ASL) a pour objet de définir les éléments du soutien indispensables à l'exploitation et à la maintenance ultérieures de l'équipement. Une part importante de l'ASL étant de jeter les bases d'un programme de maintenance en accord avec la politique interne du client. Par exemple, un document ne sera pas rédigé de la même façon suivant qu'il est destiné à un technicien de maintenance ou à un opérateur dans le cadre de la TPM.

Deux cas de figure existent : le « sur-mesure » et le « prêt-à-utiliser ». Il est évident que le niveau d'exigence du « client-maître d'œuvre » vis-à-vis du « fournisseur-maître d'ouvrage » est plus élevé dans le premier cas. La notion de partenariat et de participation à des AMDEC est alors réaliste et efficace. Mais même pour des équipements de production techniquement modestes (mais qui peuvent être « sensibles » une fois intégrés à un process) et « prêts à utiliser », la responsabilité du service « ingénierie-travaux neufs » doit s'exercer de façon allégée, mais sans négliger une revue de détail de tous les éléments du soutien logistique. Les éléments jugés indispensables ou utiles doivent alors être intégrés à la négociation d'investissement.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

10.4.4 Les éléments du SLI (soutien logistique intégré) : adaptation aux besoins industriels

❑ **Qu'est-ce que le SLI ?**

Le soutien logistique intégré consiste à assurer le maintien en conditions opérationnelles d'un système afin que ce dernier puisse assurer les missions pour lesquelles il a été conçu, pendant toute sa durée de vie. Il s'agit d'optimiser le couple disponibilité opérationnelle/coût de possession du système.

Le SLI consiste à intégrer, lors de la conception d'un système, les contraintes d'aptitude au soutien et les services associés qui assureront sa disponibilité pendant toute la période d'utilisation jusqu'à sa mise au rebut.

À l'origine de la formalisation du soutien logistique est l'US Army (normes MIL STD 1300). Cette formalisation lourde a été reprise pour les fournitures de tous les grands systèmes. Mais elle décourage par sa lourdeur les PME et même des groupes industriels. Pourtant, la démarche de la méthode SLI a fait ses preuves en terme d'efficacité.

Notre propos est donc d'adapter chaque élément du SLI à des équipements industriels modestes de façon à proposer une trame de rédaction d'un cahier des charges maintenance à destination des travaux neufs. Cela de façon à satisfaire les exigences d'exploitation et de maintenance d'un équipement en termes de ressources matérielles, humaines et documentaires. La sensibilisation des PME au SLI est d'autant plus importante :

– que le SLI est un facteur incontournable de réduction du *LCC* (coût du cycle de vie) ;

– que les métiers du SLI sont mal identifiés en France, et que peu de formations correspondantes sont proposées.

□ **Analyse du soutien logistique (ASL)**

C'est l'interface entre la conception du système technique et la conception du système de soutien. Les actions ASL permettent d'identifier, de définir, d'analyser, de qualifier et de quantifier les besoins logistiques afin d'améliorer la disponibilité du système et d'en réduire le coût global de possession.

❑ **Les neuf composantes du SLI**

Outre leur intégration à la définition de l'équipement, les neuf éléments du SLI identifiés sur la figure 10.23 doivent être :

– en adéquation avec les besoins de l'utilisateur et avec son environnement spécifique (intégration/environnement du client) ;

– en cohérence entre eux (intégration/système logistique).

Il importe, pour une opération industrielle, d'établir le cahier des charges en réfléchissant à l'impact de chacun des neuf critères dont l'importance est variable en fonction des besoins de chaque client. Mais les critères 1 et 2 sont omniprésents : nous allons les développer dans une logique d'intégration à une maintenance dimensionnée « PME ».

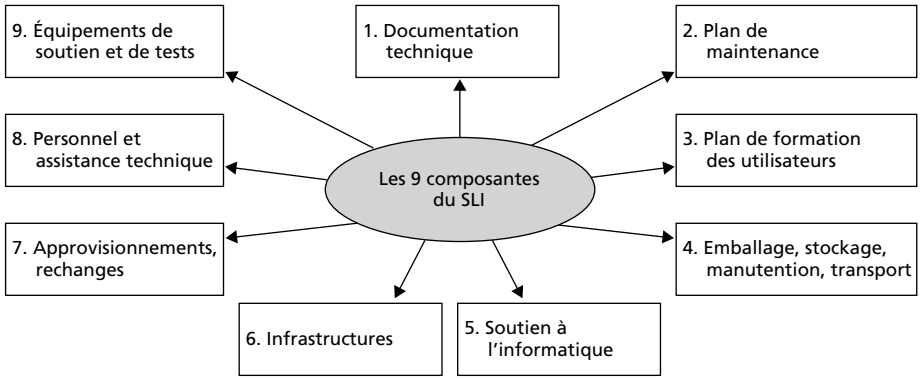


Figure 10.23 – Les composantes du SLI

❑ Adaptation du SLI aux besoins industriels

□ Documentation technique

Pour une PME, l'obtention des éléments « sources » (documents émanant du fournisseur) constitutifs du dossier technique équipement (DTE) tel que défini au paragraphe 3.3 est déjà un enjeu d'importance qui donne lieu à une négociation.

Prenons cependant l'exemple de la Marine nationale pour montrer la logique et la complexité de la méthode SLI « grands systèmes » à travers la définition de la DLU/I (documentation logistique utilisateur/installation). La DLU se décompose en 7 rubriques.

1. Organisation : découpage arborescent de l'installation.
2. Généralités et caractéristiques : présentation et fonction globale, modes de fonctionnement et de conduite, servitudes, interfaces, sécurité, caractéristique des équipements principaux.
3. Description et fonctionnement.
4. Exploitation : mesures de sécurité, contrôles, opérations d'exploitation normale, en mode secours, en mode dégradé, vérifications et réglages, liste de maintenance élémentaire (fusibles, points de lubrification, etc.).
5. Maintenance préventive : liste des opérations systématiques avec la fréquence, la durée, les ingrédients, la compétence technique, etc.
6. Maintenance corrective : répertoire des pannes les plus probables, moyens de localisation, fiches de démontage, de remontage, de réglage et d'essais.
7. Tableau de composition illustré : illustration de l'ordre de démontage des éléments constitutifs de l'installation.

□ Plan de maintenance

Le plan de maintenance est structuré à partir de l'organisation de la maintenance du client/utilisateur, de l'arborescence du système et des tâches de maintenance identifiées. Cette identification se fait à partir de la définition des solutions techniques retenues et d'une AMDEC : quelles seront les tâches prévisibles de maintenance corrective et préventive ? Cette réflexion amène à se poser, pour chaque tâche identifiée, les questions « qui fait quoi, et comment ? ».

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– Quel est le niveau de maintenance ?
– Le personnel est-il capable de réaliser cette tâche ?
– Faut-il prévoir une formation ?
– Quel document fournir utilement ?
– Quel outillage doit-il utiliser ?

La mise sous forme de tableau des tâches correctives et préventives associées aux réponses constitue le plan de maintenance (voir § 3.4).

10.4.5 Créer et faire vivre le retour d'expérience

Développer un plan de maintenance dès la conception d'un équipement n'est envisageable que par exploitation d'un retour d'expérience. Aucun don de divination n'est nécessaire : mieux anticiper dès la phase de conception les problèmes susceptibles de pénaliser la productivité future et dont la probabilité d'émergence est significative repose seulement sur l'exploitation de l'expérience acquise dans le passé. Chaque entreprise connaît ainsi les spécificités de son environnement, et le comportement pathologique des systèmes utilisés dans cet environnement.

Il faut savoir qu'un système industriel déclaré nouveau et innovant est majoritairement constitué de composants largement éprouvés, diffusés et standardisés, donc de fiabilité connue. L'organisation à imaginer concerne donc la mise à disposition des « concepteurs – maîtres d'ouvrage », de l'expérience capitalisée sur le terrain par les « utilisateurs-clients-maîtres d'œuvre ».

❑ Informations qualitatives et quantitatives

Pour que l'exploitation des informations soit riche et pertinente, il faut associer aux données quantitatives reportées sur chaque historique d'équipement les données qualitatives, qui permettent seules de comprendre les défaillances, et donc de les anticiper. « La meilleure défaillance est celle qui n'arrive pas. » Base de la maintenance proactive, cela suppose une expertise « recueillie » et exploitée le plus en amont possible, par action *ab initio* sur les causes identifiées.

□ Informations quantitatives

Extraites de la GMAO, elles consistent en une caractérisation chiffrée des événements vécus et enregistrés, sous forme de durées, parfois de coûts, et de nombres : durées d'intervention corrective ou préventive, durées d'indisponibilité de l'équipement, taux de défaillance moyen, nombre de rechanges consommés, etc. (voir § 4.4).

Traitées au niveau du service « méthodes », les informations sont mises sous forme de graphes de Pareto (identification objective des priorités d'amélioration), sous forme d'indicateurs (*MTTR*, *MTBF*, D_{op}, *TRS*) ou sous forme de lois comportementales (modèles exponentiel ou de Weibull).

Le problème majeur de l'exploitation fiabiliste des données en PME tient à la taille souvent trop faible des échantillons de valeurs, qui amène à des intervalles de confiance bien trop larges pour être significatifs. Ce problème est minoré par une forte standardisation des équipements et de leurs composants, lorsque c'est possible, imposée par le cahier des charges maintenance en phase d'investissement.

Un autre problème concerne « l'agrégat » des modes de défaillance, certains étant sans effet sur la production, alors que d'autres induisent des pertes : que signifie alors le taux de défaillance moyen ?

Notons l'existence de banques de données collectées soit par des organismes spécialisés (CNET, RAC, NPRD2, Oreda, etc.) soit par certains constructeurs.

☐ **Informations qualitatives**

Elles consistent dans le recueil des « fiches d'analyse qualitative de défaillance » que les agents des méthodes ou le GAP (groupe d'analyse de pannes) élaborent dans leur démarche d'amélioration permanente de chaque équipement sensible (voir § 4.5). Ces fiches d'autoexpertise identifient au cas par cas les causes intrinsèques et extrinsèques ayant conduit à la défaillance constatée. Base de l'exploitation du retour d'expérience en interne, ces données sont également la base du retour d'expérience externe destiné au concepteur via le service « ingénierie-travaux neufs ».

En interne, « on ne peut sérieusement prévenir que les événements que l'on a compris ». En externe, en phase de conception, « on ne peut éliminer de l'avant-projet que les défaillances potentielles que l'on a déjà vécues et élucidées ». C'est le principe même des AMDEC réalisées en présence d'utilisateurs, riches de leur expérience de terrain, donc capables d'estimer l'occurrence d'une défaillance en fonction de ses causes potentielles, puis son impact sur l'environnement industriel.

Afin de mettre en évidence la richesse des informations qualitatives, prenons un exemple élémentaire de défaillance comprise ou non : la dégradation d'un joint d'étanchéité.

1er cas

On ne dispose que de données quantitatives. La *MTBF* d'un type de joint est de 680 heures, d'où une réflexion conduisant :

– à changer préventivement ce joint toutes les 500 heures, par exemple ;
– à stocker les joints de rechanges nécessaires à cette politique d'apparence logique !

2e cas

Une auto-expertise montre que l'huile agresse le joint ; on change alors le matériau de façon à ce que le joint ne soit plus jamais attaqué. Il devient donc inutile de le changer périodiquement, donc d'avoir à le stocker, et donc d'en passer commande. Cet exemple met en évidence *la nécessité de ne pas omettre les données qualitatives dans un retour d'expérience que l'on veut efficace*.

❑ **Recueil d'expérience**

☐ **Quelle est la condition d'une bonne collecte ? La rigueur**

Le recueil d'expérience ne sera crédible et exploitable que s'il est rigoureux :

– rigueur dans l'imputation des codes, dans les relevés de temps par les opérateurs sur le terrain ;
– rigueur dans le vocabulaire utilisé : les rédacteurs de fiches initiales et les utilisateurs du retour d'expérience doivent s'appuyer sur une définition stricte des termes employés ;
– rigueur dans la description de l'environnement du matériel ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

– rigueur dans la précision des modalités de calcul des taux et des indicateurs ;
– rigueur dans les procédures de collectes, normalement définies dans le cadre de l'assurance qualité. « Faire ce qui est écrit, écrire ce qui est fait » nécessite un apprentissage souvent difficile.

☐ Autres conditions concernant la collecte

Nous avons déjà abordé le problème du « niveau de signification » de données en nombre insuffisant, ainsi que celui de « l'agrégat » des modes de défaillance : la nature de l'exploitation (que veut-on savoir ?) doit conditionner la nature des informations collectées, et non l'inverse !

Un frein au recueil de l'expérience, particulièrement sensible en PME, tient à la sensibilisation d'un personnel souvent réduit et pressé : or le temps nécessaire à la saisie des paramètres n'est pas négligeable. Il est réduit par une utilisation bien comprise d'une GMAO, véhicule naturel du retour d'expérience interne. Il appartient au management de l'entreprise de vérifier que la collecte d'un retour d'expérience bien défini est rentable à terme. Si oui, il lui appartient de se donner les moyens de sa politique en favorisant l'appropriation par tous les acteurs d'un retour d'expérience fiable et exploitable.

Une source souvent négligée de recueil d'expérience se situe au niveau du démantèlement d'un équipement en fin de vie : une expertise des sous-ensembles portant sur les potentiels résiduels de durée de vie est riche d'enseignements. Malheureusement, bien des équipements sont mis au rebut sans expertise, ce qui pose bien le problème d'accepter un surcoût immédiat (et facilement évitable !) pour un gain ultérieur.

❑ Exploitation du retour d'expérience

L'exploitation en interne est intégrée à la gestion normale des équipements : elle se fait au niveau du bureau des méthodes, par capitalisations cumulées des données opérationnelles. L'exploitation peut être quotidienne, hebdomadaire, puis annuelle et pluriannuelle. Elle vise à l'amélioration permanente des performances et à l'optimisation des plans de maintenance.

Synthétisée, elle permet le suivi du vieillissement des équipements, et concerne alors les travaux neufs qui ont vocation de gérer le renouvellement des équipements obsolescents.

☐ Interface utilisateur/fournisseur

L'exploitation en externe se rapporte spécifiquement à ce chapitre : comment intégrer la maintenance dès la conception d'un système ? Elle se situe à l'interface utilisateur/fournisseur.

Pour l'utilisateur, le service ingénierie-travaux neufs a pour mission d'élaborer le cahier des charges d'acquisition des systèmes de remplacement, bien évidemment en tirant parti de l'expérience acquise dont les méthodes-maintenance sont la mémoire. Chacun des neuf éléments du SLI doit faire l'objet d'une préconisation déduite et enrichie des problèmes rencontrés dans le passé de l'équipement et dans le passé des relations avec le fournisseur, via son SAV souvent. De la même façon, les critères d'aptitude à la maintenance doivent s'appuyer sur le retour d'expérience.

La remontée des informations peut se faire plus en amont par la participation directe du client-utilisateur à des groupes de travail de type « analyse de la valeur » ou AMDEC chez le concepteur. De la même manière que peut être négociée une formation chez le fournisseur, par exemple avec la participation des techniciens de maintenance aux phases finales de montage et d'essais de l'équipement. Cet apprentissage a l'avantage de diminuer considérablement les délais de mise au point d'intégration ainsi que de prise en responsabilité par la maintenance.

□ **Conclusions**

L'entreprise ne peut plus se permettre d'acheter et de « consommer » des équipements. Sa participation technique est indispensable au niveau ou en amont de l'acquisition, sous des formes à imaginer. La définition du partenariat et des structures d'interface fournisseur-client reste à établir, mais l'enjeu est d'importance pour les PME, qui ont l'ambition de :

– investir mieux pour « faire bien du premier coup » ;
– investir mieux pour bénéficier d'une exploitation simple, sûre et rentable ;
– diminuer chaque composante du coût global de possession, dont les coûts de maintenance.

Dans tous les cas, le temps de l'acheteur d'équipement à compétence purement commerciale est révolu.

10.5 Un modèle d'organisation pour les PME : « de la panne tant pis à la panne tant mieux »

Ce paragraphe est constitué du texte et des actes d'une conférence présentée par l'auteur le 15 août 1996 lors du 1er Congrès international de maintenance industrielle, organisé par l'université de Tula Tepeji au Mexique. Le titre en espagnol est : *De la descompostura in modo a la descompostura mucho mejor.*

10.5.1 Thème et constat préalable

Exposé d'un modèle d'organisation visant à améliorer la disponibilité des systèmes de production automatisés, principalement destiné aux nombreuses PME mexicaines en cours de structuration.

❑ **Résumé**

L'idée de base s'inspire de la maintenance productive totale. Notre propos est de développer un modèle d'organisation applicable à des petites et moyennes entreprises, à partir d'un terrain social propice, de façon à améliorer la disponibilité opérationnelle de l'appareil productif, donc la compétitivité de ces entreprises. Cela sans alourdir ni les effectifs, ni les moyens, ni les structures, mais en optimisant le potentiel humain présent. Cet exposé comprend quatre parties :

1. un *constat préalable* qui pose un problème mal résolu par les organisations traditionnelles de maintenance ;
2. l'organisation du temps réel par constitution d'*équipes d'automaintenance* ;
3. l'organisation du temps différé par constitution d'un *groupe d'analyse de panne* ;

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

4. un modèle de *formation-action* adapté à la phase de démarrage de cette maintenance productive simplifiée.

❑ Constat préalable

Tout système automatisé génère :
– un grand nombre de petits arrêts, notés Nt_A et nommés « microdéfaillances » ;
– un petit nombre de grands arrêts, notés nT_A et nommés « pannes durables ».

Si l'on met en place un système de mesures en temps réel de ces arrêts, sur une période de temps significative (1 an, par exemple), on constate systématiquement la loi de comportement de la figure 10.24 suivante :

$$N \cdot t_A + n \cdot T_A = \Sigma\, T_A$$

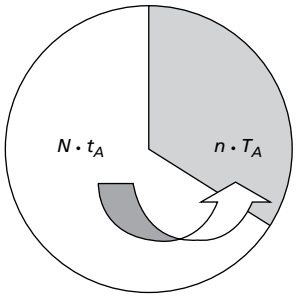


Figure 10.24 – Répartition des temps d'indisponibilité

Les mesures montrent que, sur une période de mesures significative, le poids relatif des microdéfaillances est plus important que le poids des quelques pannes durables ! Et cette proportion a tendance à augmenter, ce qui s'explique techniquement par la part croissante des parties commandes. Entre autres causes, elles sont le siège naturel des problèmes d'interfaces et de connectique caractéristiques des microdéfaillances.

Remarques

– Les pannes durables sont toujours paramétrées, qualifiées et saisies : elles sont bien connues et elles marquent la mémoire des techniciens. Les microdéfaillances (ou microarrêts dans une logique TPM) font partie de la routine du travail : elles ne sont ni mesurées, ni saisies : elles s'évaporent !
– Les microdéfaillances répétitives, dépannées mais jamais analysées, ne s'arrangent pas toutes seules. De plus, elles sont souvent, par leur multiciplicité, à l'origine de pannes durables.

❑ Conclusion

L'organisation proposée découle de ce constat : les microarrêts répétitifs pénalisent lourdement la disponibilité des systèmes automatisés, d'où l'intérêt de l'automaintenance soutenue par un groupe d'analyse de pannes (GAP). La lutte anti-microarrêts, donc anti-pertes de productivité, est donc la cible privilégiée de notre organisation de *maintenance productive allégée*.

10.5.2 Rôle de l'équipe d'automaintenance

Il s'agit d'impliquer et de former les opérateurs d'une ligne de production afin qu'ils prennent en charge de façon autonome la surveillance du « bon fonctionnement » de l'outil productif, mais aussi les petites interventions de niveau 1 et 2 (réglages, petits dépannages, etc.) ainsi que « l'hygiène » (nettoyage 5 S et petit préventif d'initiatives). Ces travaux sont faits en autonomie sans recourir au service maintenance. Ils sont saisis, mesurés en durée et qualifiés en nature pour analyse ultérieure.

L'appropriation de l'équipement se fera en équipe et progressivement avec l'aide de la maintenance, suivant la stratégie de formation nommée GAF décrite au paragraphe 10.5.4.

❑ **Enjeu opérationnel**

L'automaintenance permet des gains de temps et de productivité très considérables : par exemple 5 minutes dans le cadre de l'automaintenance avec prise en charge de l'incident par l'opérateur, ou 40 minutes en cas d'intervention d'un technicien de maintenance, pas forcément disponible, et cela pour un événement par nature répétitif. La proportion est souvent pire dans la réalité.

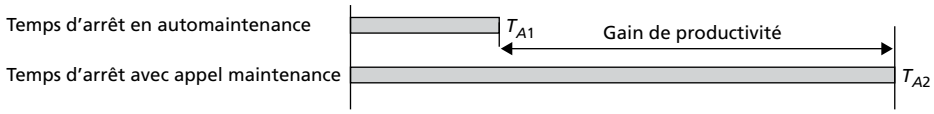


Figure 10.25

❑ **Enjeu social**

Favoriser la promotion des opérateurs qui veulent (motivation, initiative encadrée) et qui savent (formation continue, niveau d'origine) par requalification des postes. Le slogan de l'automaintenance est : *je veux, je sais, je peux, donc je fais*.

❑ **Définition**

Prise en charge d'un secteur de production, par une équipe de « maintenance productive », donc polyvalente et progressivement autonome :
– des 5 S (hygiène de la machine et de son environnement) ;
– de la surveillance « active » et de tâches préventives simples ;
– de la maintenance de premier niveau, corrective et préventive ;
– des tâches normales de production (programmation, outillage, réglages) ;
– éventuellement de la qualité : relevés de mesures sous MSP (maîtrise statistique du procédé) d'un système automatisé de production.

❑ **Objectif**

– Assurer une surveillance et un « soin » permanent de l'équipement.
– Favoriser l'appropriation d'un moyen de production par une équipe polyvalente lorsque l'organisation du travail et l'effectif le permettent.
– Améliorer la technicité de chaque membre de l'équipe.
– Réduire les temps d'arrêt pour chaque micro défaillance par une prise en charge immédiate.
– Réduire le nombre des petits arrêts.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Tous ces éléments concourent à augmenter la disponibilité opérationnelle du système, donc la productivité. De plus, le transfert de charge vers la production permet à la maintenance de se consacrer à des travaux requérant une plus haute technicité.

❑ **Moyens**

L'équipe d'automaintenance est formée à cette prise en charge partielle et progressive, les appels à la maintenance s'espaçant dans le temps. Des moyens sur site sont développés de façon à faciliter cette prise en charge : testeurs, outils d'aide à la localisation, à l'imputation, voire au diagnostic.

L'autonomie est obtenue en 2 ou 3 ans, le recours à la maintenance ne se faisant plus que pour moins de 10 % des incidents. L'équipe est soutenue, en cas de difficulté, par les techniciens de maintenance chargés du préventif non transféré et des interventions de niveau 3 et 4 (pannes durables et autres travaux à forte technicité).

10.5.3 Rôle du groupe d'analyse de pannes (GAP)

❑ **Constitution**

Ce groupe comprend un animateur qui peut être l'agent des méthodes de maintenance du secteur, des techniciens de maintenance, les opérateurs (par rotation, suivant leur service) chargés de l'automaintenance, ainsi qu'un ou *n* experts suivant les problèmes abordés.

❑ **Fonctionnement**

Le GAP est périodique (3 heures par semaine, par exemple) et permanent (à la différence des cercles de qualité). Le GAP aborde les problèmes qui ont le plus pénalisé la disponibilité de la ligne concernée pendant la période précédente. Ce sont soit des petits arrêts répétitifs, soit des pannes durables. Cet « ordre du jour » est sélectionné par l'agent des méthodes animateur après l'exploitation du retour d'expérience collecté la semaine précédente et après comparaison avec les périodes antérieures (graphes d'évolution). Après discussion, le GAP recherche les causes de ces incidents et il propose des solutions d'amélioration à mettre en œuvre.

❑ **Objectifs**

Il s'agit de s'appuyer sur des pannes vécues et observées par les opérateurs, pour identifier et supprimer leurs causes, donc d'engendrer une dynamique d'amélioration de la disponibilité qui concerne tous les acteurs techniques intéressés par le bon fonctionnement de l'équipement.

La collecte des informations relatives aux interventions réalisées est à la base du système. Elle permet d'exploiter le retour d'expérience en interne pour mettre en œuvre des améliorations et pour générer une « base de données interne » indispensable à la préparation des interventions correctives comme préventives. Elle permet également la transmission de ce retour d'expérience cumulé vers les travaux neufs afin d'améliorer la conception, ou vers les fournisseurs d'équipement, appelés à devenir des partenaires comme agents d'amélioration ultérieure.

Un autre objectif du GAP est évidemment d'assurer la formation continue des opérateurs, appelés à prendre de la distance par rapport à la logique de routine du

court terme inévitable sur le terrain : « c'est déréglé, je règle ! ». Il participera, lors des réunions du GAP, à la réflexion collective permettant de trouver :

1. les causes du déréglage ;
2. les moyens pour « ne plus avoir à régler ».

Cette organisation de « progrès permanent » repose sur un diagnostic collectif réalisé à partir de la connaissance de la panne, de ses paramètres et de ses conditions d'apparition. Qui, mieux que l'opérateur présent sur site, peut fournir ces éléments de connaissance ?

10.5.4 Une stratégie de formation adaptée : le groupe action-formation (GAF)

C'est le maillon logique indispensable entre l'automaintenance et le GAP, qui permet d'accompagner la phase de développement de ce projet transversal « production, maintenance ».

❑ Objectif du GAF

Former les opérateurs par résolution collective de problèmes réels, rencontrés sur leur équipement, de façon à les rendre progressivement autonomes.

❑ Moyens à mettre en œuvre

La formation se fait par réunions périodiques, progressivement espacées, travaillant :

– à partir des problèmes rencontrés sur l'équipement pendant la période précédant la réunion ;
– avec des compléments d'information, et le soutien d'experts internes ou invités ;
– à la rédaction des règles de conduite et des fiches d'automaintenance ;
– à la définition de moyens d'aide au dépannage ;
– à la suggestion d'améliorations.

❑ Principe de fonctionnement

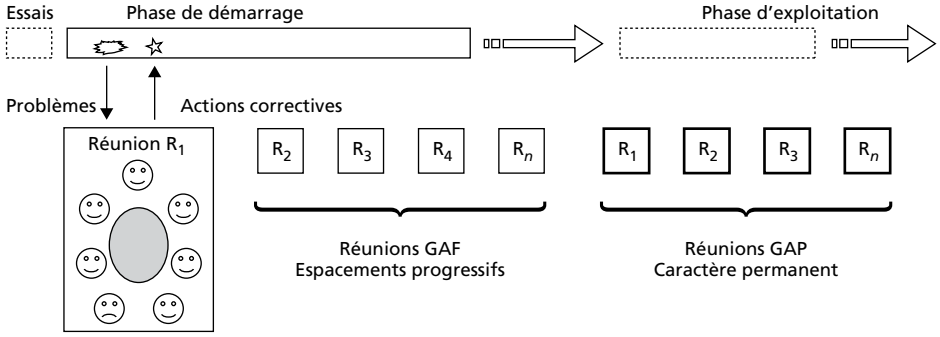


Figure 10.26 – Principe de fonctionnement des GAF

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

Les réunions du groupe d'action-formation sont animées par le responsable des « méthodes » du secteur concerné. Outre les opérateurs (ou certains opérateurs, par roulement lorsqu'ils travaillent en 3 × 8 par exemple), le groupe comprend les techniciens de maintenance, ainsi que des « experts » internes ou invités (concepteurs ou vendeurs de l'équipement).

De façon très « naturelle », la part d'autonomie devenant croissante (les appels à la maintenance diminuant), le GAF évolue vers le GAP, qui a, lui, un caractère permanent (fréquence hebdomadaire à mensuelle).

10.5.5 Synthèse de l'organisation TPM simplifiée

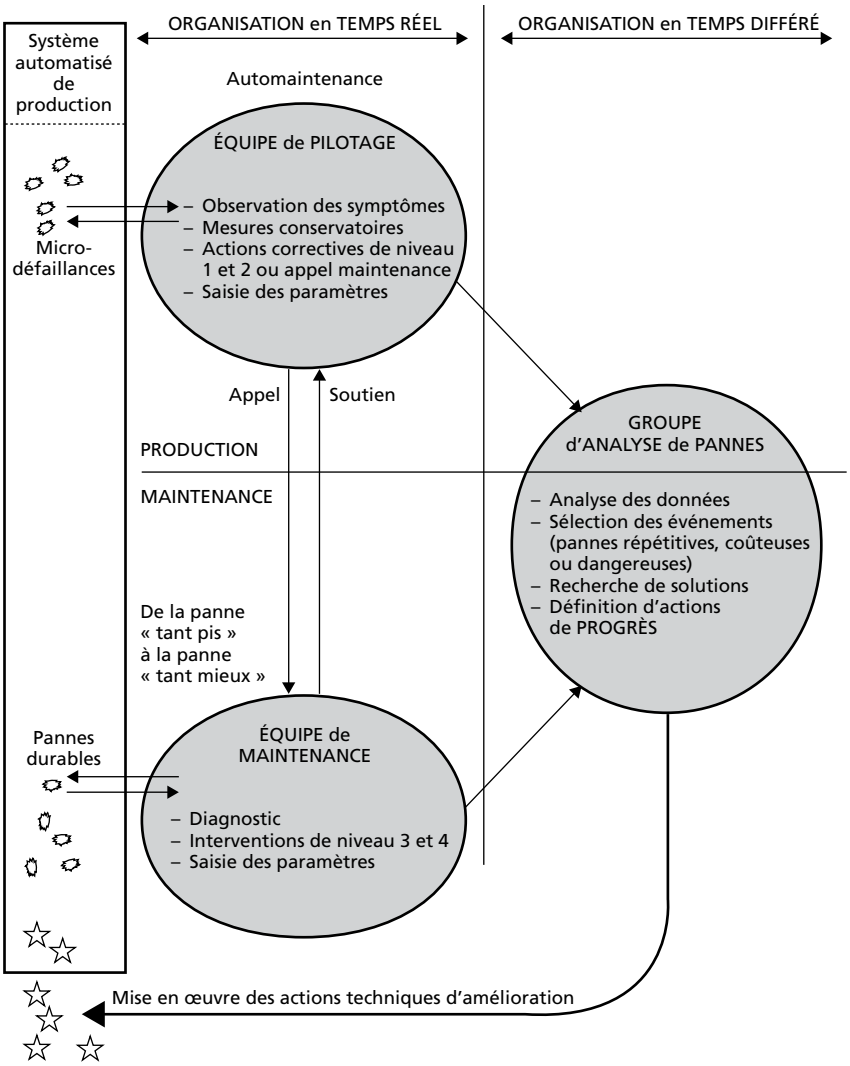


Figure 10.27 – Schéma de synthèse de l'organisation préconisée

10.5.6 Conclusion

Nous avons démystifié le titre de l'exposé : la *descompostura mucho mejor* ! C'est-à-dire la « panne tant mieux », qu'il faut interpréter comme une panne localisée, puis diagnostiquée, puis prévenue par un collectif d'acteurs de l'entreprise. Cette prévention se fait en rupture avec la routine du seul dépannage. La modestie apparente de ce miniprogrès, caractéristique du kaizen, masque la richesse de la méthode qui permet de s'affranchir du cercle vicieux de l'entretien : « Plus il y a de pannes, plus je cours. Plus je cours, plus il y a de pannes ! »

Car la panne comprise, l'arrêt fortuit démystifié, le déréglage pérennisé, le défaut élucidé – tout ce qu'Imai, le promoteur du kaizen, nomme les *welcome problems* – représentent pour l'entreprise le plus riche gisement d'amélioration permanente de la productivité, de la qualité et de la sécurité.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

BIBLIOGRAPHIE

(ACA 87) ACADI, *La maîtrise des risques technologiques* (actes de colloque), Londez Conseil, Paris, 1987.

(ADE 94) ADEPA, CETIM (collectif), *Faites votre autodiagnostic maintenance,* CETIM, Paris, 1994.

(AFI 95) AFIM, *Guide national de la maintenance,* AFIM, Paris, 1995.

(AFN 94) AFNOR, *Recueil de normes : Gérer et assurer la qualité*, 2 tomes, AFNOR, Paris, 1994.

(AFN 88) AFNOR, *Fiabilité, maintenabilité, disponibilité,* AFNOR, Paris, 1988.

(AFN 97) AFNOR, *Les normes ISO 9000 pour les PME,* AFNOR, Paris, 1997.

(APA 92) APAVE et TÉLÉMÉCANIQUE, *La sûreté des machines et installations automatisées*, Sadave, Paris, 1992.

(AUB 92) AUBLIN M., *Systèmes mécaniques*, Dunod, Paris, 1992.

(BAT 77) BATTERSBY A., *Méthodes modernes d'ordonnancement,* Dunod, Paris, 1977.

(BOY 81) BOYER L., *Précis d'organisation et de gestion de la production*, Éd. d'Organisation, Paris, 1981.

(BRU 95) BRUNET S., GARDIN H., *Pratiques du reengineering,* ESF Éd., Paris, 1995.

(CET 93) CETIM (collectif), *Sûreté des automatismes*, CETIM, Paris, 1993.

(CET 95) CETIM (collectif), *Les diagrammes RTHM,* CETIM, Paris, 1995.

(CET 96) CETIM (collectif), *Analyse morphologique des défaillances d'organes de machine,* CETIM, Paris, 1996.

(CHA 96) CHAUVEL A.-M., *Méthodes et outils pour résoudre un problème,* Dunod, Paris, 1996.

(DES 95) DESROCHES A., *Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité*, Tec & Doc, Paris, 1995.

(DUN 87) DUNAUD M., *Maîtriser la qualité et les coûts des produits et des projets,* Masson, Paris, 1987.

(GAB 85) GABRIEL M., PIMOR Y., *Maintenance assistée par ordinateur,* Masson, Paris, 1985.

(GIR 97) GIRARD B., *Guide pratique du responsable Maintenance,* Weka, Paris, 1997.

(HER 95) HERSAN C., *Vade-mecum Assurance Qualité*, Tec & Doc, Paris, 1995.

(IMA 89) IMAI M., *Kaisen, la clé de la compétitivité japonaise,* Eyrolles, Paris, 1989.

(INR 94) INRS et CRAM (collectif), *Maintenance et maîtrise du risque,* INRS, Paris, 1994.

(KAR 94) KARLOFF B., OSTBLOM S., *Le benchmarking : un indicateur d'excellence, en matière de qualité et de productivité*, Masson, Paris, 1994.

(KEP 74) KEPNER TREGOE, *Dépannage méthodique*, Princeton Research Press, Princeton, États-Unis, 1974.

(LAV 92) LAVINA Y., *Audit de la maintenance*, Éd. d'Organisation, Paris, 1992.

(LAV 96) LAVINA Y., *Réussir l'automaintenance,* Éd. d'Organisation, Paris, 1996.

(LAV 98) LAVINA Y., *Maintenance et Assurance de la qualité,* Éd. d'Organisation, Paris, 1998.

(LEG 92) LE GALLOU F., BOUCHON-MEUNIER B., *Systémique : théorie et applications,* Tec & Doc, Paris, 1992.

(LEP 85) LEPLAT J., *Erreur humaine, fiabilité humaine dans le travail,* Armand Colin, Paris, 1985.

(LIG 79) LIGERON J. C., *La fiabilité en mécanique,* Desforges, Paris, 1979.

(LIG 92) LIGERON J. C., LYONNET (P), *La fiabilité en exploitation : organisation et traitement des données,* 2 tomes, Tec & Doc, Paris, 1992.

(LYO 86) LYONNET P., *La maintenance. Mathématiques et méthodes*, Tec & Doc, Paris, 1986.

(MAR 74) MARCOVICI C., LIGERON J. C., *Utilisation des techniques de fiabilité en mécanique,* Tec & Doc, Paris, 1974.

(MEL 90) MELESE J., *Approches systémiques des organisations*, Éd. d'Organisation, Paris, 1990.

(MOB 92) MOBLEY R. K., *La maintenance prédictive,* Masson, Paris, 1992.

(MON 90) MONCHY F., *La fonction maintenance. Formation à la gestion de la maintenance industrielle*, 2e éd. corrigée, Masson, Paris, 1990.

(MOU 90) MOUSSET P., *L'expertise métallurgique appliquée aux centrales thermiques EDF,* Éd. Kirk, Maisons-Alfort, 1990.

(NAK 86) NAKAJIMA S., *La maintenance productive totale (TPM), nouvelle vague de la production industrielle*, AFNOR, Paris, 1986.

(PAG 80) PAGES A., GONDRAN M., *Fiabilité des systèmes,* Eyrolles, Paris, 1980.

(PIM 91) PIMOR Y., *TPM. La maintenance productive,* Masson, Paris, 1991.

(PIM 01) PIMOR Y., *Logistique. Techniques et mise en œuvre,* Dunod, Paris, 2e édition, 2001.

(RIB 87) RIBOUD E., *Modernisation, mode d'emploi,* 10/18, Paris, 1987.

(RIC 96) RICHET, GABRIEL, MALON, BLAISON, *Maintenance basée sur la fiabilité,* Masson, Paris, 1996.

(ROS 83) ROSEAUX, *Phénomènes aléatoires en recherche opérationnelle,* Masson, Paris, 1983.

(VIG 92) VIGIER M., *La pratique du Quality Function Deployment,* Éd. d'Organisation, Paris, 1992.

(VIS 85) VISENTINI G., *Comment augmenter sa productivité par la maintenance,* Usine nouvelle, Paris, 1985.

(WEI 95) WEKA (collectif), *Certification et management de la qualité,* 2 volumes, Weka, Paris, 1995.

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ABC : méthode de Pareto (priorité d'actions)
ABAC-ABAD : méthode de planification de la maintenance systématique
ADEPA : Association pour le développement de la productique et de l'automatisation
AF : analyse fonctionnelle
AFIM : Association française des ingénieurs et responsables de maintenance
AFNOR : Association française de normalisation
AMDEC : analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité
API : automate programmable industriel
APR : analyse préliminaire des risques (méthode)
AQ : assurance de la qualité
ASL : analyse du soutien logistique
BPT : bon de petits travaux
BSM : bon de sortie de magasin
BT : bon de travail
BTp : bon de travail préventif
C_d : coût de défaillance
C_i : coût d'indisponibilité (indirect)
C_m : coût de maintenance (direct)
C_{ma} : coût moyen annuel
CEM : compatibilité électromagnétique
CEN : Comité européen de normalisation
CGP : coût global de possession
CND : contrôle non destructif
CNM : Comité national de la maintenance
CPM : *critical path method* (méthode)
DA : demande d'approvisionnement
DT : demande de travail
DTE : dossier technique d'un équipement
D_∞ : disponibilité asymptotique

D_c : disponibilité contractuelle
D_i : disponibilité instantanée
D_{op} : disponibilité opérationnelle
FFT : *fast Fourier transformation*
FIT : fiche d'intervention technique
FMDS : fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité
FME(C)A : *failure mode effect critically analysis* (AMDEC)
GAF : groupe action-formation
GAP : groupe d'analyse de pannes
GMAO : gestion de la maintenance assistée par ordinateur
GPAO : gestion de la production assistée par ordinateur
GTC : gestion technique centralisée
HAZOP : *hazard and operability study* (méthode)
I_c : intervention corrective
I_{pc} : intervention préventive conditionnelle
I_{ps} : intervention préventive systématique
INRS : Institut national de recherche sur la sécurité
ISDF : Institut de la sûreté de fonctionnement
ISO : International Standardization Organization
IUT : institut universitaire de technologie
JAT : juste-à-temps (JIT : *just in time*)
JMA : Japan Management Association
LCC : *life cycle cost* (coût du cycle de vie)
MBF : maintenance basée sur la fiabilité (méthode)
MSP : maîtrise statistique des procédés (technique)
MTA : moyenne des temps d'arrêt
MTBF : *mean time between failure* (*TBF* : durée de bon fonctionnement)
MTI : moyenne des temps propres d'indisponibilité (*MTD* : *mean down time*)
MTM : *method time measurement*
MTTR : *mean time to repair* (TTR : temps technique de réparation)
OMF : optimisation de la maintenance par la fiabilité (méthode)
OST : organisation scientifique du travail
OT : ordre de travail (OT_c/Ot_p : ordre de travail correctif/préventif)
PC : *personal computer*
PERT : *planning evaluation and review technique* (méthode)
PGM : procédure générale de maintenance
PME/PMI : petites et moyennes entreprises/industries
PQE : plan qualité d'un équipement
QFD : *quality function deployment* (méthode)

© Dunod – La photocopie non autorisée est un délit.

RCM : *reliability centered maintenance*
RO : rendement opérationnel (*TRS*)
S_a : stock d'alerte
S_c : stock de couverture
S_S : stock de sécurité
SAV : service après-vente
SdF : sûreté de fonctionnement
SMED : *single minute exchange die*
SLI : soutien logistique intégré
TA : durée d'arrêt
TO : temps d'ouverture (d'une ligne de production)
TQC : *total quality control*
TPM : *total productive maintenance* (méthode)
TRS : taux de rendement synthétique
V_A : valeur d'acquisition
VSD : vendredi-samedi-dimanche (équipes)

INDEX

5 M, 128
5 S, 340, 344

A

ABAC-ABAD
  méthode, 46, 278
ABC
  courbe, 119
  méthode, 119, 323
accessibilité, 199
action prioritaire, 29
actions correctives, 34
actuariat, 148
aide à la décision, 77
ajustement graphique, 175
AMDEC, 128, 489
amélioration, 30, 224, 340, 470
  organisation, 233
analyse
  définition, 24
  formalisation, 25
analyse des risques, 409
analyse fonctionnelle, 130
antenne de secteur, 20, 333
appel d'offre, 392
APR, 409
arborescence d'un équipement, 71, 140
arbre de décision, 25
arbre des causes, 116
architecture client-serveur, 352
arrêts périodiques, 60
ASL, 498
association de matériels, 163
assurance-qualité, 6, 65, 434
atelier central, 20, 333
automaintenance, 276, 296, 344, 461, 476, 479, 505
automates programmables, 109

B

benchmarking, 455
budget, 376
budget annuel admissible, 449

C

capacité de charge, 305
cellule TPM par secteur, 473
CEM, 110
certification, 432, 440
charge
  lissage, 320
charges de travail, 33, 299
charte de la maintenance, 10
codes d'imputation, 82
codification, 69
collecte des informations, 50
comité de pilotage, 473
communication, 26
compatibilité électromagnétique, 110
composites, 107
comptabilité, 258
conception d'un équipement, 496
conception modulaire, 44
consignes permanentes, 276
contrat de maintenance, 387, 390
contrat de moyens, 390
contrat de résultats, 390
contrôles non destructifs, 53, 56
contrôles périodiques, 401
correctif résiduel, 19, 41
corrosion, 105
cost and fee, 389
courbe en baignoire, 145
coût global de référence, 441
coût moyen annuel, 448
coût moyen par unité d'usage, 441
coûts de défaillance, 264
coûts de maintenance, 256, 372
coûts de maintenance préventive, 265
coûts directs de maintenance, 260
coûts indirects d'indisponibilité, 262
criticité
  indice, 131
cycle de vie, 443, 493

D

danger d'un système, 405

décentralisation, 17, 334
décision
  arbre, 77
découpage fonctionnel, 69
défaillance, 31
  actuariat, 148
  analyses, 359
  analyses prévisionnelles, 126
  analyses qualitatives, 87, 501
  analyses quantitatives, 118
  arbres, 133
  causes, 130
  criticité, 131
  définitions, 88
  effets, 131
  genèse, 93
  localisation, 91, 114
  mécanismes, 97
  modes, 130
  relevés, 118
  taux, 144
  typologie, 89
défaillance humaine, 235
défaillance mécanique, 98
défaillances potentielles, 130
dégradation, 48, 88, 101
délit de marchandage, 403
démontabilité, 200
dépannage, 287
dépose, 200, 337
détectabilité, 200
détection, 91
déverminage, 339
diagnostic, 93, 374
  définitions, 110
  méthodologie, 110
  systèmes experts, 294
dialogique, 413
directives machines, 399
directives sociales, 400
disponibilité, 139
  amélioration, 419
  analyses, 217
  composition, 221
  définition, 139, 214
  perte, 80
disponibilité asymptotique, 127, 216, 221
disponibilité contractuelle, 217
disponibilité instantanée, 216
disponibilité opérationnelle, 215
disponibilité prévisionnelle, 217
documentation maintenance, 65
donneur d'ordre, 390
dossier constructeur, 71
dossier technique, 68
dossier technique équipement, 70
DTE, 68, 70
durabilité, 441
durée de vie, 45, 145
durées d'intervention, 253

E

échange standard, 336
entretien, 4, 10, 13, 18, 61
environnement, 404, 438
équipe autonome par chantier, 473
équipement, 496
  environnement, 340
  performances, 372
erreur de diagnostic, 116, 239
erreur en maintenance, 238
essais de fiabilité, 166
estimations statistiques, 151
expertise, 93, 96
externalisation, 382

F

fatigue, 99
fiabilité, 139, 140, 157, 208
  analyse, 167
  analyses, 156
  essais, 166
  indicateurs, 142
fiabilité humaine, 234
fiche de tâche, 315
fichier historique, 68, 80
FMD, 139
  analyses, 141
  indicateurs, 142
fonction de distribution, 160, 196
fonction de répartition, 160, 196
formation, 21
frottement, 100

G

gamme d'intervention, 271
Gantt
  diagramme, 301
garantie, 336

gestion, 17, 349
gestion budgétaire, 376
gestion des équipements, 355
gestion des interventions, 356
gestion du préventif, 357
GMAO, 69, 349, 437
  progiciels, 353
  projet, 362
grands arrêts, 280, 396
groupe action-formation, 507
groupe d'analyse de pannes, 506

H

HAZOP
  méthode, 408
huiles
  analyses, 56

I

indicateurs, 123, 142, 368
indice de criticité, 131
interchangeabilité, 45, 198
intervalle de confiance, 169, 183
intervention
  période, 40
intervention conditionnelle, 48, 52
intervention de maintenance, 336
intervention systématique, 39, 187
inventaire, 69
inventaire des équipements, 68
Ishikawa
  diagramme, 128

K

kaizen, 427
Kiviat
  diagramme, 374

L

lancement, 308
LCC, 441, 443, 493
life cycle cost, 441, 443, 493
logistique, 9
logistique de maintenance, 321
logistique de soutien, 321
loi de Poisson, 168
loi de Weibull, 170
loi des valeurs extrêmes, 212
loi exponentielle, 167
lubrification, 281

M

magasin, 17
magasinage, 335
maintenabilité, 139, 140, 208
  analyse, 211, 252
  définitions, 197
  indicateurs, 143
maintenance
  charte, 10
  définition, 7
  efficacité, 372
  histoire, 3
  interface, 13
  lot, 328
  management, 413
  missions, 12
  niveaux, 58
  nouvelles organisations, 451
  plan, 74
  réglementation, 398
  service, 11
maintenance ab initio, 9
maintenance basée sur la fiabilité, 482
maintenance conditionnelle, 266
maintenance corrective, 31, 33
maintenance d'amélioration, 9
maintenance hospitalière, 6
maintenance immobilière, 6
maintenance préventive, 31, 35, 274, 338
maintenance proactive, 9, 87, 93
maintenance productive, 6
maintenance productive totale, 9, 266, 459
maintenance programmée, 36, 476
maintenance systématique, 36, 39, 265
management participatif, 421, 424
Markov
  graphes, 210
matériel
  classification, 66
  renouvellement, 449
MBF, 482, 483, 486
méthodes, 20, 243
  agent, 245
microdéfaillances, 80, 504
modularité, 198
module, 44, 140, 279
MTBF, 42, 173, 181

N

normes, 7
normes ISO 14000, 438
normes ISO 9000, 386, 431

O

observation, 24
optimisation, 75, 188, 254, 265
optimisation économique, 43
ordonnancement, 16, 243, 297
  gamme, 310, 312
  missions, 297
  niveaux, 303
  terminologie, 299
ordonnancement des projets, 313
organigramme, 15
organisation « sociotechnique », 452

P

panne, 31, 88, 465
Pareto
  diagrammes, 118
  graphes, 233
parties « commande », 108
période d'intervention, 40
PERT, 313
pertes de performance, 464
pertes économiques, 266
PGM, 436
pièces de rechange, 328
plan de charge, 304
plan de maintenance, 68, 73, 74, 499
plan de prévention, 404
planning, 301
planning d'atelier, 306
planning de charge, 304
planning de lancement, 306
plans qualité-équipement, 437
plastiques, 107
PME
  organisation, 503
Poisson
  loi, 168, 329
polyvalence, 22
PQE, 437
préparation, 267
prestataire, 390
probabilité
  lois, 154
procédure, 236
procédure générale de maintenance, 436
projet, 301, 315
  conduite, 416
  délai, 320
propreté, 342

Q

qualité, 158
  projet, 430
qualité totale, 463

R

ratios, 369
ratios normalisés, 375
réactivité, 5
réalisation, 243, 331
réapprovisionnement, 325
rechange
  codification, 335
  gestion, 170, 321
reconstruction, 59, 340
redondances, 165
réduction des dépenses, 418
reengineering, 457
rémunération, 380
renouvellement, 449
rénovations, 59
ressources humaines, VII, 360, 421
retour d'expérience, 80, 97, 500
révisions, 59
risque, 402
ronde, 339
roulement, 100
roulement à billes, 193
ruptures, 103

S

saisies
  organisation, 232
santé-matière, 98
schéma d'enclenchement, 271, 310
SdF, 7, 126, 497
sécurité, 235, 398, 406
seuil d'admissibilité, 51
seuil d'alarme, 48, 51
seuil de fiabilité, 173
signature, 48
SLI, 497
sous-traitance, 391, 403

soutien logistique, 322, 496
  analyse, 498
standardisation, 199
statistique descriptive, 152
stock de sécurité, 327
stocks
  gestion, 324, 358
suivi des dépenses, 359
supervision, 54
sûreté de fonctionnement, 7, 126, 496
surveillance active, 339
symptômes, 50, 91, 112
systèmes réparables, 139

T

tableaux de bord, 360, 368
taux de défaillance, 144, 147, 161, 196
taux de qualité, 469
taux de rendement synthétique, 467
taux de réparation, 207
télédiagnostic, 294
télémaintenance, 54
télésurveillance, 54
temps
  mesure, 248
temps d'état des équipements, 255
temps d'indisponibilité, 256, 504
temps d'usage, 40
temps de maintenance, 248, 250
temps de productivité, 465
temps-machine, 248
térotechnologie, 9
tests de diagnostic, 293
tests paramétriques, 156
thermographie infrarouge, 56
tierce maintenance, 391
topomaintenance, 9
TPM, 9, 266, 459
transversalité, VIII, 21
travaux externalisés, 274, 357
travaux neufs, 19, 60, 494

U

usure, 99
  loi, 101

V

valeurs extrêmes
  loi, 212
vibrations
  analyses, 282
  analyseurs, 55
visite, 339
visites préventives, 278

W

Weibull
  loi, 170, 196
  papier, 173
Wöhler
  courbe, 104